

日本国特許庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出願年月日

Date of Application:

2001年 3月30日

出願番号

Application Number:

特願2001-100719

出願人

Applicant(s):

古河電気工業株式会社

2001年 8月 3日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

及川耕造

出証番号 出証特2001-3070038

【書類名】 特許願  
 【整理番号】 A01035  
 【あて先】 特許庁長官 殿  
 【国際特許分類】 H04B 10/00

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号 古河電気工業株式会社内

【氏名】 松下 俊一

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号 古河電気工業株式会社内

【氏名】 麻生 修

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号 古河電気工業株式会社内

【氏名】 坂野 操

【特許出願人】

【識別番号】 000005290  
 【氏名又は名称】 古河電気工業株式会社  
 【代表者】 古河 潤之助  
 【電話番号】 045-311-1220

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 005267  
 【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1  
 【物件名】 図面 1  
 【物件名】 要約書 1

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 4 光波混合を用い雑音を考慮した波長変換方法と波長変換器および光源

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 複数のチャンネルからなる波長多重信号光を 4 光波混合により異なる波長に変換する際に、波長変換後の波長多重信号光の強度と該変換後の波長多重信号光の近傍に生じる高次 4 光波混合による雑音の強度との比を、励起光の強度または／および 4 光波混合による波長変換前の波長多重信号光の強度を用いて調節することを特徴とする 4 光波混合による波長変換方法。

【請求項 2】 複数のチャンネルからなる波長多重信号光を 4 光波混合現象により波長変換する際に、励起光の周波数から最も近い波長変換前の波長多重信号光の周波数と励起光の周波数の間隔または／および波長変換前の波長多重信号の帯域幅、を調節することで、波長変換後の波長多重信号光の強度と該変換後の波長多重信号光の近傍に生じる高次 4 光波混合による雑音強度の比を調節することを特徴とする波長変換方法。

【請求項 3】 複数のチャンネルからなる波長多重信号光を 4 光波混合現象により波長変換する際に、励起光の周波数から最も近い 4 光波混合による波長変換前の波長多重信号光の周波数と該励起光の周波数の間隔が、4 光波混合による波長変換前の波長多重信号光の周波数帯域幅よりも大きいか等しい事を特徴とする 4 光波混合による波長変換方法。

【請求項 4】 複数のチャンネルからなる波長多重信号光を周波数の異なる 2 つの励起光を用いた 4 光波混合現象によって波長変換する際に、2 つの励起光周波数の平均値と 2 つの励起光周波数のどちらか一方の励起光周波数の間に波長変換前の波長多重信号光があり、該平均値と一つの励起光周波数との周波数間隔または／および波長変換前の波長多重信号光の周波数帯域幅を調節することで、4 光波混合現象による波長変換後の波長多重信号光の強度と該変換後の波長多重信号光の近傍に生じる高次 4 光波混合による雑音強度の比を制御することを特徴とする波長変換方法。

【請求項 5】 複数のチャンネルからなる波長多重信号光を周波数の異なる 2 つ

の励起光を用いた 4 光波混合現象によって波長変換する際に、2 つの励起光周波数の平均値と 2 つの励起光周波数のどちらか一方の励起光周波数の間に 4 光波混合による波長変換前の波長多重信号光があり、該平均値と一つの励起光周波数との間の周波数帯域幅が、4 光波混合による波長変換前の波長多重信号周波数帯域幅の 2 倍以上ある事を特徴とする 4 光波混合による波長変換方法。

【請求項 6】 励起光の周波数は 4 光波混合現象が生じる変換媒質の零分散周波数と一致する請求項 2、3 の波長変換方法。

【請求項 7】 2 つの励起光周波数の平均値は 4 光波混合現象が生じる変換媒質の零分散周波数に一致する請求項 4、5 の波長変換方法。

【請求項 8】 複数のチャンネルが、周波数間隔の等しい周波数グリッドに一致するような、請求項 1 ～ 7 記載の波長変換方法。

【請求項 9】 周波数間隔が等間隔おきに刻まれた周波数グリッドに一致するような 4 光波混合による波長変換前の波長多重信号に一致させた複数のチャンネル周波数が在って、隣り合う 2 つの周波数グリッドの間に励起光周波数がある事を特徴とする請求項 8 の波長変換方法。

【請求項 10】 周波数間隔が等間隔おきに刻まれた周波数グリッドに一致するような 4 光波混合による波長変換前の波長多重信号に一致させた複数のチャンネル周波数が在って、隣り合う 2 つの周波数グリッドの間に請求項 4、5、7 の 2 つの励起光周波数平均値がある事を特徴とする 4 光波混合による波長変換方法。

【請求項 11】 請求項 2 又は 3 又は 6 の方法による波長変換器の励起光周波数と請求項 4 又は 5 又は 7 方法による波長変換器の 2 つの励起光周波数の平均値が等しい 4 光波混合による波長変換器があって、複数のチャンネルからなる波長多重信号光を 2 つの周波数帯域に分け、請求項 2 又は 3 又は 6 の方法による波長変換器の該励起光周波数から最も離れた周波数のチャンネルを含む分割された一方の周波数帯域からなる波長多重信号光を請求項 2 又は 3 又は 6 の方法による波長変換器に入力し、波長変換を行った後光フィルタによって 4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光を抽出した出力と、請求項 4 又は 5 又は 7 の方法による波長変換器の 2 つの励起光周波数平均値から最も近い周波数のチャンネルを含む



分割された他方の周波数帯域からなる波長多重信号光を請求項 4 又は 5 又は 7 の方法による波長変換器に入力し、波長変換した後光フィルタによって 4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光を抽出した出力を合波する波長変換器。

【請求項 1 2】 複数のチャンネルが、周波数間隔の等しい周波数グリッドに一致するような、請求項 1 1 記載の波長変換器。

【請求項 1 3】 請求項 1 1 又は 1 2 の波長変換器において、請求項 2 又は 3 又は 6 の方法による波長変換器の励起光周波数と請求項 4 又は 5 の又は 7 方法による波長変換器における 2 つの励起光周波数の平均値は 4 光波混合現象が生じる変換媒質の零分散周波数に等しいことを特徴とする波長変換器。

【請求項 1 4】 請求項 1 ～ 1 0 の波長変換方法のいずれか一つを用いて、波長多重された光を異なる帯域に波長変換した後、波長変換後の光を利用することを特徴とする光源。

【請求項 1 5】 請求項 1 ～ 1 0 の波長変換方法で、四光波混合による波長変換前の信号光強度を調節することで四光波混合による波長変換後の信号光を所望の周波数特性を有する強度にすることを特徴とする波長変換方法。

【請求項 1 6】 請求項 1 1 又は 1 2 又は 1 3 の波長変換器において、四光波混合による波長変換前の信号光の強度を調節することで四光波混合による波長変換後の信号光の強度を所望の周波数特性を有する強度にすることを特徴とする波長変換器。

【請求項 1 7】 請求項 1 4 の光源において、四光波混合による波長変換前の光の強度を調節することで四光波混合による波長変換後の光の強度を所望の周波数特性を有する強度有することを特徴とする光源。

【請求項 1 8】 請求項 1 ～ 1 0 及び 1 5 の波長変換方法で、波長変換前の信号光の強度又は/及び波長変換後の信号光の強度を光フィルタを用いて変換後の信号光の強度を所望の周波数特性を有する強度にすることを特徴とする波長変換方法。

【請求項 1 9】 請求項 1 1 ～ 1 3 及び 1 6 の波長変換器において、波長変換前の信号光の強度又は/及び波長変換後の信号光の強度を光フィルタを用いて四光波混合による波長変換後の強度を所望の周波数特性を有する強度にすることを特

徴とする波長変換器。

【請求項 2 0】 請求項 1 4 及び 1 7 の光源において、波長変換前の信号光の強度又は/及び波長変換後の信号光の強度を光フィルタを用いて四光波混合による波長変換後の光の強度を所望の周波数特性を有する強度にすることを特徴とする光源。

【請求項 2 1】 請求項 1 ～ 1 0 及び 1 5 及び 1 8 の波長変換方法で、光増幅器をもちいて四光波混合による波長変換前又は/および四光波混合による波長変換後の信号光の強度を増幅させることを特徴とする波長変換方法。

【請求項 2 2】 請求項 1 1 ～ 1 3 及び 1 6 及び 1 の波長変換器において、光増幅器を用いて四光波混合による波長変換前又は/および四光波混合による波長変換後の信号光の強度を増幅させることを特徴とする波長変換器。

【請求項 2 3】 請求項 1 4 及び 1 7 及び 2 0 の光源において、光増幅器を用いて四光波混合による波長変換前又は/および四光波混合による波長変換後の信号光の強度を増幅させることを特徴とする光源。

【請求項 2 4】 請求項 1 ～ 1 0 及び 1 5 及び 1 8 及び 2 1 の波長変換方法で、ラマン光増幅器をもちいて四光波混合による波長変換前または/および四光波混合による波長変換後、変換信号光の強度を増幅させると共にラマン利得形状を制御することで、四光波混合による波長波長変換後の信号光の強度を所望の周波数特性を有する強度にすることを特徴とする波長変換方法。

【請求項 2 5】 請求項 1 1 ～ 1 3 及び 1 6 及び 1 9 及び 2 2 の波長変換器において、ラマン光増幅器をもちいて四光波混合による波長変換前または/および四光波混合による波長変換後、信号光の強度を増幅させると共にラマン利得形状を制御することで、四光波混合による波長波長変換後の信号光の強度を所望の周波数特性を有する強度にすることを特徴とする波長変換器。

【請求項 2 6】 請求項 1 4 及び 1 7 及び 2 0 及び 2 3 の光源において、ラマン光増幅器をもちいて四光波混合による波長変換前または/および四光波混合による波長変換後、信号光の強度を増幅させると共にラマン利得形状を制御することで、四光波混合による波長波長変換後の信号光の強度を所望の周波数特性を有する強度にすることを特徴とする光源。

【請求項 2 7】 請求項 1 4 及び 1 7 及び 2 0 及び 2 3 及び 2 6 の光源で、L 帯の波長多重光を波長変換により S 帯に変換し、変換後の光を用いることを特徴とする S 帯用光源。

【発明の詳細な説明】

【0 0 0 1】

【発明の属する技術分野】

本発明は、低い光周波数帯にある波長多重信号を一括して高い光周波数に、或いは高い光周波数帯にある波長多重信号を一括して低い光周波数帯に変換する 4 光波混合を用いた波長変換方法及び波長変換器に関する。

【0 0 0 2】

【関連する背景技術】

複数のチャンネルからなる波長多重信号を一括して低い光周波数帯から高い光周波数に、或いは高い光周波数帯から低い光周波数帯に変換する波長変換を、光—電気—光変換を用いて変換しようとするれば、複数のチャンネルに対して、複数のホトダイオード及び複数のチャンネル対応した発振波長の異なる複数のレーザダイオードが必要である。従って、光—電気—光変換を用いる波長変換器は部品数が多くなる為、装置の小型化やコスト削減が難しい面があった。又変換周波数帯域によっては、変換帯域先の複数のチャンネルに対応した発振波長の異なる複数のレーザダイオードが現実には存在しない事もある。及び電気による仲介があるため、光—電気、電気—光の応答速度に上限がある為に信号の伝送ビットレートには上限があった。

【0 0 0 3】

【発明が解決しようとする課題】

4 光波混合を用いた波長変換は、応答速度が高速なため光-電気-光による波長変換に比べ、より高速な伝送速度に対応が可能となる。

【0 0 0 4】

しかし、4 光波混合を用いて波長多重信号を波長変換する場合、目的とする波長変換先の波長多重信号の他に、励起光の周波数を中心とした両側波帯に、波長多重信号光の内少なくとも 1 本を励起光として用いる 4 光波混合による雑音が生じ

る。この信号光の内少なくとも 1 本を励起光として利用する 4 光波混合現象を高次 4 光波混合現象と呼ぶ。この高次 4 光波混合は雑音の原因となる。そのため、4 光波混合を用いて波長多重信号を波長変換する際には、通信品質を維持又は向上させるため 4 光波混合による波長変換後の波長多重信号チャンネル信号強度と、この雑音強度の比を制御する必要がある。

【0005】

【課題を解決するための手段】

上記課題を解決する為の第 1 の発明は、複数のチャンネルからなる波長多重信号光を 4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光の強度と該変換後の波長多重信号の近傍に生じる高次 4 光波混合による雑音強度との比を、励起光の強度と変換前の波長多重信号光の強度を変える事で制御することを特徴とする 4 光波混合による波長変換方法である。

【0006】

上記課題を解決する為の第 2 の発明は、複数のチャンネルからなる波長多重信号光を 4 光波混合によって波長変換する際に、励起光の周波数から 4 光波混合による波長変換前の波長多重信号光の最も近い周波数のチャンネルと該励起光の周波数との間の周波数帯域と励起光の周波数から 4 光波混合による波長変換前の波長多重信号光の最も遠い周波数のチャンネルと該励起光の周波数との間の周波数帯域幅を用いて、4 光波混合による変換後の波長多重信号光の強度と該変換後の波長多重信号光の近傍に生じる高次 4 光波混合による雑音強度の比を制御することを特徴とする波長変換方法である。

【0007】

上記課題を解決する為の第 3 の発明は、複数のチャンネルからなる波長多重信号光を 4 光波混合によって波長変換する際に、励起光の周波数から 4 光波混合による波長変換前の波長多重信号光の最も近い周波数のチャンネルと該励起光の周波数との間の周波数帯域が、該波長多重信号光の周波数帯域幅よりも大きい等しい事を特徴とする 4 光波混合による波長変換方法であって、高次 4 光波混合による雑音の周波数帯域と 4 光波混合波長変換後の波長多重信号周波数帯域が重ならないように 4 光波混合波長変換前の波長多重信号光の周波数配置を規定したもの

である。

【0008】

上記課題を解決する為の第4の発明は、複数のチャンネルからなる波長多重信号光を2つの異なる周波数の励起光を用いた4光波混合によって波長変換する際に、2つの励起光周波数の平均周波数と2つの励起光のどちらか一方の励起光周波数の間に4光波混合による波長変換前の波長多重信号光があり、該平均周波数と一つの励起光周波数との間の周波数帯域幅と該平均周波数と1つの励起光周波数との間の周波数帯域幅を制御することで、4光波混合による変換後の波長多重信号光の強度と該変換後の波長多重信号光の近傍に生じる高次4光波混合による雑音強度の比を制御することを特徴とする波長変換方法である。

【0009】

上記課題を解決する為の第5の発明は、複数のチャンネルからなる波長多重信号光を2つの異なる周波数の励起光を用いた4光波混合によって波長変換する際に、2つの励起光周波数の平均周波数と2つの励起光のどちらか一方の励起光周波数の間に4光波混合による波長変換前の波長多重信号光があり、該平均周波数と一つの励起光周波数との間の周波数帯域幅と4光波混合波長変換前の波長多重信号周波数帯域幅の2倍以上ある事を特徴とする波長変換方法であって、高次4光波混合による雑音の周波数帯域と4光波混合波長変換後の波長多重信号周波数帯域が重ならないように、中心周波数と一つの励起光周波数との間の周波数帯域幅を規定したものである。

【0010】

上記課題を解決する為の第6の発明は、請求項2又は3の方法による波長変換方法において、励起光の周波数と変換媒質の零分散周波数を等しくし、4光波混合による変換効率を向上し変換帯域を拡大させるものである。

【0011】

上記課題を解決する為の第7の発明は、請求項4又は5において励起光の周波数と変換媒質の零分散周波数を等しくし、4光波混合による変換効率を向上し変換帯域を拡大させるものである。

【0012】

上記課題を解決する為の第 8 の発明は、発明第 1 から第 7 の少なくとも一つにおいて、周波数間隔が等間隔おきに刻まれた周波数グリッドに一致するような 4 光波混合による波長変換前の波長多重信号に一致させた複数のチャンネルを利用するものである。

【 0 0 1 3 】

上記課題を解決する為の第 9 の発明は、第 8 の発明において 4 光波混合に用いる励起光の周波数を、周波数が等間隔おきに刻まれた周波数グリッドの中間に配置し、4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光の周波数と高次 4 光波混合による雑音の周波数が重ならないように配置する方法である。

【 0 0 1 4 】

上記課題を解決する為の第 1 0 の発明は、請求項 4、5、7 の発明において、周波数間隔が等間隔おきに刻まれた周波数グリッドに一致するような 4 光波混合による波長変換前の波長多重信号に一致させた複数のチャンネルを利用し、4 光波混合に用いる 2 つの励起光の周波数平均値を、該周波数グリッドの中間に配置し、4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光の周波数と高次 4 光波混合による雑音の周波数が重ならないように配置する方法である。

【 0 0 1 5 】

上記課題を解決する為の第 1 1 の発明は、請求項 2 又は 3 又は 6 の方法による波長変換器の励起光周波数と請求項 4 又は 5 又は 7 の方法による波長変換器の 2 つの励起光周波数の平均周波数が等しい事を特徴とする 4 光波混合による波長変換器であって、複数のチャンネルからなる波長多重信号光を 2 つの周波数帯域に分け、請求項 2 又は 3 又は 6 の方法による波長変換器の該励起光周波数から最も離れた周波数のチャンネルを含む分割された一方の周波数帯域からなる波長多重信号光を請求項 2 又は 3 又は 6 の方法による波長変換器に入力し、光フィルタによって波長変換後の波長多重信号光を抽出した出力と、請求項 4 又は 5 又は 7 の方法による波長変換器の 2 つの励起光周波数平均周波数から最も近い周波数のチャンネルを含む分割された他方の周波数帯域からなる波長多重信号光を請求項 4 又は 5 又は 7 の方法による波長変換器に入力し、光フィルタによって 4 光波混合波長変換後の波長多重信号光を抽出した出力を合波する波長変換器であって、効率

良く伝送路の周波数帯域幅を利用するものである。

【 0 0 1 6 】

上記課題を解決する為の第 1 2 の発明は、請求項 1 1 の発明において、周波数間隔が等間隔おきに刻まれた周波数グリッドに一致するような 4 光波混合による波長変換前の波長多重信号に一致させた複数のチャンネルを利用するものである。

【 0 0 1 7 】

上記課題を解決する為の第 1 3 の発明は、請求項 1 1 又は 1 2 において、請求項 2 又は 3 又は 6 の波長変換で 4 光波混合に用いる励起光の周波数及び、請求項 4 又は 5 又は 7 の波長変換で 4 光波混合に用いる 2 つの励起光の周波数の平均値を、周波数が等間隔おきに刻まれた周波数グリッドの中間に配置し、4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光の周波数と高次 4 光波混合による雑音の周波数が重ならないように配置する方法である。

【 0 0 1 8 】

上記課題を解決する為の第 1 4 の発明は、請求項 1 ～ 1 0 の少なくとも 1 つの波長変換方法を利用した波長多重光源である。

【 0 0 1 9 】

上記課題を解決する為の第 1 5 の発明は、請求項 1 ～ 1 0 の波長変換方法において、4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光の強度を 4 光波混合による波長変換前の波長多重信号光の強度を用いて制御する方法である。

【 0 0 2 0 】

上記課題を解決する為の第 1 6 の発明は、請求項 1 1 ～ 1 3 の波長変換器において、4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光の強度を 4 光波混合による波長変換前の波長多重信号光の強度を用いて制御する波長変換器である。

【 0 0 2 1 】

上記課題を解決する為の第 1 7 の発明は、請求項 1 4 の波長変換を利用した波長多重光源において、4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光の強度を 4 光波混合による波長変換前の波長多重信号光の強度を用いて制御する波長多重光源である。

【 0 0 2 2 】

上記課題を解決する為の第 1 8 の発明は、請求項 1 ～ 1 0 及び 1 5 の波長変換方法において、波長変換前の信号光の強度又は/及び波長変換後の信号光の強度を 4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光の強度を光フィルタ用いて制御する方法である。

【 0 0 2 3 】

上記課題を解決する為の第 1 9 の発明は、請求項 1 1 ～ 1 3 及び 1 6 の波長変換器において、波長変換前の信号光の強度又は/及び波長変換後の信号光の強度を 4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光の強度を光フィルタを用いて制御する波長変換器である。

【 0 0 2 4 】

上記課題を解決する為の第 2 0 の発明は、請求項 1 4 及び 1 7 の波長変換を利用した波長多重光源において、波長変換前の信号光の強度又は/及び波長変換後の信号光の強度を 4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光の強度を光フィルタを用いて制御する波長多重光源である。

【 0 0 2 5 】

上記課題を解決する為の第 2 1 の発明は、請求項 1 ～ 1 0 及び 1 5 及び 1 8 の波長変換方法において、4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光の強度を光増幅器を用いて増幅する波長変換方法である。

【 0 0 2 6 】

上記課題を解決する為の第 2 2 の発明は、請求項 1 1 ～ 1 3 及び 1 6 及び 1 9 の波長変換器において、4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光の強度を光増幅器を用いて増幅する波長変換器である。

【 0 0 2 7 】

上記課題を解決する為の第 2 3 の発明は、請求項 1 4、1 7、2 1 の波長変換を利用した波長多重光源において、4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光の強度を光増幅器を用いて増幅する波長多重光源である。

【 0 0 2 8 】

上記課題を解決する為の第 2 4 の発明は、請求項 1 ～ 1 0、1 5、1 8、2 1 の波長変換方法において、4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光の強度をラ



マン光増幅器を用いて増幅及び制御する方法である。

【 0 0 2 9 】

上記課題を解決する為の第 2 5 の発明は、請求項 1 1 ～ 1 3、1 6、1 9、2 2 の波長変換器において、4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光の強度をラマン光増幅器を用いて増幅及び制御する波長変換器である。

【 0 0 3 0 】

上記課題を解決する為の第 2 6 の発明は、請求項 1 4、1 7、2 0、2 3 の波長変換を利用した波長多重光源において、4 光波混合による波長変換後の波長多重信号光の強度をラマン光増幅器を用いて増幅及び制御する波長多重光源である。

【 0 0 3 1 】

上記課題を解決する為の第 2 7 の発明は、L 帯にある波長多重信号を請求項 9 による波長変換を行って S 帯に 4 光波混合による波長変換する方法であって、C 帯、L 帯にある波長多重信号を S 帯に 4 光波混合による波長変換する際に伴う、高次 4 光波混合によって生じる雑音を排除し、S 帯に適当な発振波長を持たないレーザーダイオードの代りに信号光源として 4 光波混合による波長変換後の波長多重信号を使用するものである。

【 0 0 3 2 】

以上の発明により、高次 4 光波混合による雑音の影響を受けにくい波長変換方法及び波長変換器及び波長多重光源が実現される。

【 0 0 3 3 】

そのため、変換したい帯域先の複数のチャンネルに対応した発振波長の異なる複数のレーザーダイオードが現実には存在しない場合でも、例えば C 帯（1 5 3 0 n m ～ 1 5 6 5 n m）、L 帯（1 5 6 5 n m ～ 1 6 2 5 n m）にあるレーザーダイオードを利用して、L 帯にある波長多重信号を S 帯（1 4 6 0 n m ～ 1 5 3 0 n m）に波長変換を行えば S 帯の波長多重信号もしくは波長多重光源として利用できる。この逆も可能で、例えば、C 帯のレーザーダイオードを使用して、L 帯にもしくは L 帯より長波側に波長変換し、波長多重信号としてもしくは波長多重光源として利用できる。

【 0 0 3 4 】

【発明の実施の形態】

本発明の4光波混合による波長変換は物質の3次の非線型分極光学応答による4光波混合現象を利用している。4光波混合は媒質中を伝播する3つの異なる周波数（波長）の光が物質の非線型分極光学応答により、相互作用し、該周波数とは異なった周波数を持つ光を生成するものである。4光波混合による波長変換の基本原理を説明する。

以下断りのない限り波長変換は、4光波混合による波長変換を指すものとする。

【 0 0 3 5 】

媒質中を伝播する3つの異なる周波数を $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ として、4光波混合により生成される光の周波数を $\omega_c$ で表わすと数式1となる。

数式1

$$\omega_c = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3 \quad (\omega_2 \neq \omega_3)$$

【 0 0 3 6 】

変換後の光の周波数 $\omega_3$ は、 $\omega_1$ と $\omega_2$ の平均周波数 $(\omega_1 + \omega_2) / 2$ を中心として周波数軸上で $\omega_3$ に対して対称な位置に現れる。図1は上述の説明を図解したものである。

四光波混合の励起光周波数を $\omega_p$ として、 $\omega_s$ を信号光の周波数とし、 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_p$ 、 $\omega_3 = \omega_s$ とすると、数式1は数式2となる。

数式2

$$\omega_c = 2\omega_p - \omega_s$$

【 0 0 3 7 】

数式2は、波長変換後の $\omega_{cs}$ が周波数軸上で励起光周波数 $\omega_p$ を中心として $\omega_s$ に対して対称な位置に現れることを数式2は示している。数式2のような4光波混合を縮退4光波混合現象と呼ぶ。図2は上述の説明を図解したものである。

以下では、本発明の雑音を考慮した4光波混合の波長変換の基本原理を説明する。

。

【 0 0 3 8 】

複数のチャンネルからなる波長分割多重信号光を一括して4光波混合の波長変換

を行う場合、数式 2 で表現される波長変換の他に、数式 2 の表現で用いた励起光周波数  $\omega_p$  と複数チャンネルの波長多重信号光の 1 つが励起光の作用をする高次 4 光波混合が生じる。この高次 4 光波混合により生じた変換光は雑音の原因となり得る。

励起光は波長分割多重信号光の周波数帯域から外れているものとし、波長分割多重信号光の各チャンネルの周波数に励起光周波数  $\omega_p$  から近い順番に、 $\omega_{s1}$ 、 $\omega_{s2}$ 、…と番号をつけ、 $i$  番目の周波数を  $\omega_{si}$ 、 $j$  番目の周波数を  $\omega_{sj}$  とする。つづいて高次 4 光波混合によって生じる雑音の周波数を  $\omega_{nji}$  を式で表わすと数式 3 となる。

【0 0 3 9】

数式 3

$$\omega_{nji} = \omega_p + \omega_{sj} - \omega_{si}$$

【0 0 4 0】

励起光周波数  $\omega_p$  に最も近い雑音周波数は、波長分割多重信号の内チャンネル同士の周波数間隔が最小な二つのチャンネル  $\omega_{sj}$ 、 $\omega_{si}$  によって決定される。この高次 4 光波混合によって生じる雑音の周波数  $\omega_{n1}$ 、 $\omega_{n-1}$  が励起光周波数  $\omega_p$  に最も近い周波数である。

高次 4 光波混合による雑音周波数  $\omega_{n1}$ 、 $\omega_{n-1}$  と、周波数軸上で波長分割多重信号光のチャンネル周波数  $\omega_{s1}$ 、 $\omega_{s2}$  に対して励起光周波数  $\omega_p$  を中心対称にした周波数に位置する波長変換後の信号光周波数  $\omega_{cs1}$ 、 $\omega_{cs2}$  が図 3 に示されている。

【0 0 4 1】

励起光周波数  $\omega_p$  から最も遠い高次 4 光波混合によって生じる雑音の周波数は、数式 3 によって  $|\omega_{sj} - \omega_{si}|$  が最も大きい、波長分割多重信号光  $\omega_{sj}$ 、 $\omega_{si}$  の二つによって決まり、その大きさは波長分割多重信号光の占める周波数帯域幅と等しい。

高次 4 光波混合によって生じる雑音のうちで、励起光周波数から最も離れた雑音周波数は、周波数軸上で励起光周波数  $\omega_p$  の両側に位置し、その間隔は波長分割多重信号光の占める周波数帯域幅と等しい。従って高次 4 光波混合によって生じ

る雑音は、周波数軸上で励起光周波数  $\omega_p$  の両側に位置し、かつ波長分割多重信号帯域幅の 2 倍の帯域幅を持つ。

また、該雑音は励起光周波数  $\omega_p$  を中心として、波長分割多重信号光の内チャンネル同士の周波数間隔が最小な間隔を持つ二つのチャンネルで決定される周波数間隔を最小の間隔とし、雑音帯域内に離散的に位置している。

#### 【 0 0 4 2 】

従って励起光周波数  $\omega_p$  に最も近い波長分割多重信号光  $\omega_{s1}$  と励起光周波数  $\omega_p$  の周波数間隔が、波長分割多重信号光の占める周波数帯域幅よりも広い場合には、高次 4 光波混合によって生じる雑音周波数帯と 4 光波混合を用いた波長変換後の波長分割多重信号光周波数帯は重なり合わない。

#### 【 0 0 4 3 】

励起光周波数  $\omega_p$  に最も近い波長分割多重信号光の  $\omega_{s1}$  と励起光周波数  $\omega_p$  の周波数間隔が、波長分割多重信号光の占める周波数帯域幅よりも等しいか、あるいは狭い場合には、高次 4 光波混合によって生じる雑音と波長分割多重信号光の周波数帯域が、重なるか、お互いに近傍に迫るため、波長分割多重信号光の  $S/N$  が劣化する。

#### 【 0 0 4 4 】

この場合、波長分割多重信号光の強度と高次 4 光波混合によって生じる雑音の強度の比を、通信品質維持や向上のため信号対雑音比  $S/N$  が例えば 3 0 d B 以上になるようにしなければならない。

以下に、波長変換後の波長分割多重信号光の強度と高次 4 光波混合によって生じる雑音周波数の強度の比を制御する方法を説明する。

#### 【 0 0 4 5 】

波長変換前の波長分割多重信号光の周波数  $\omega_{si}$ 、 $\omega_{sj}$ 、 $\omega_{sk}$  とし、各周波数に対応する光の強度を  $P_{si}$ 、 $P_{sj}$ 、 $P_{sk}$  とし、励起光の周波数を  $\omega_p$ 、強度を  $P_p$  とする。

#### 【 0 0 4 6 】

波長変換前の周波数  $\omega_{sk}$  の波長分割多重信号光が 4 光波混合によって波長変換されると、 $\omega_{csk} = 2\omega_p - \omega_{sk}$  の周波数を持つ波長分割多重信号光となる。その強

度を  $P_{\text{csk}}$  とし、 $\omega_{\text{csk}}$  の近傍に生じる高次 4 光波混合による雑音の強度を  $P_n$  とする。

【0047】

一般に 4 光波混合による変換光の強度  $P$  は、変換光の素になる 3 つの光の強度を  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  とすると数式 4 で与えられる。

数式 4

$$P = \alpha P_1 \times P_2 \times P_3$$

変換光の素になる 3 つの光の強度  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  以外のパラメータは便宜上一定として  $\alpha$  の中に組み込んだ。

【0048】

数式 4 より、縮退 4 光波混合波による長変換後の周波数  $\omega_{\text{csk}}$  をもつ波長分割多重信号光の強度  $P_{\text{csk}}$  は、

数式 5

$$P_{\text{csk}} = \alpha P_p^2 \times P_{\text{sk}}$$

で与えられる。

【0049】

周波数  $\omega_{\text{si}}$ 、 $\omega_{\text{sj}}$  の波長変換前の波長分割多重信号光と励起光周波数  $\omega_p$  から高次 4 光波混合による雑音の強度  $P_n$  は数式 6 によって与えられる。

数式 6

$$P_n = \beta P_p \times P_{\text{si}} \times P_{\text{sj}}$$

変換光の素になる 3 つの光の強度  $P_p$ 、 $P_{\text{si}}$ 、 $P_{\text{sj}}$  以外のパラメータは便宜上一定として  $\beta$  の中に組み込んだ。

【0050】

周波数が  $\omega_{\text{csk}}$  の強度  $P_{\text{csk}}$  と、高次 4 光波混合による雑音の強度  $P_n$  の比は数式 5、数式 6 から数式 7 で与えられる。

数式 7

$$P_{\text{csk}} / P_n = \alpha P_p \times P_{\text{sk}} / \beta P_{\text{si}} \cdot P_{\text{sj}}$$

で与えられる。

【0051】

波長変換後の波長分割多重信号光の強度とその近傍に生じる高次 4 光波混合による雑音強度の比は、数式 7 より励起光の強度と波長変換前の波長分割多重信号光の強度比を用いて制御が可能である。

波長変換後の波長分割多重信号光と高次 4 光波混合による雑音の周波数軸上の位置関係について説明する。

#### 【0052】

高次 4 光波混合によって生じる雑音が、波長変換後の波長分割多重信号光の周波数  $\omega_{csk}$  の近傍に在る為の条件は、励起光周波数  $\omega_p$  と該励起光周波数  $\omega_p$  に最も近い波長変換前の波長分割多重信号光の周波数  $\omega_i$  との間隔が、波長変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域幅よりも小さいか、等しく、かつ  $|\omega_p - \omega_{sk}| = |\omega_{sj} - \omega_{si}|$  をほぼ満たす事である。後者の条件を物理的に言い換えると、波長変換前の波長分割多重信号光チャンネルの内、任意の二つの周波数  $\omega_{si}$ 、 $\omega_{sj}$  の周波数間隔が、波長変換後の波長分割多重信号光チャンネル周波数  $\omega_{csk}$  の素となる波長変換前波長分割多重信号光チャンネル周波数  $\omega_{sk}$  と励起光周波数  $\omega_p$  の周波数間隔にほぼ等しい事である。

#### 【0053】

つまり、波長変換前の波長分割多重信号光の内、任意の一つの周波数  $\omega_{sk}$  と励起光周波数  $\omega_p$  との周波数間隔が、二つの周波数  $\omega_{si}$ 、 $\omega_{sj}$  の周波数間隔にほぼ等しい場合には、波長変換後の波長分割多重信号光周波数  $\omega_{csk}$  と波長変換前の波長分割多重信号光チャンネル周波数  $\omega_{si}$ 、 $\omega_{sj}$  によって生じた雑音はその近傍にある。

励起光の強度と波長変換前の周波数  $\omega_{sk}$ 、 $\omega_{si}$ 、 $\omega_{sj}$  に対応する波長分割多重信号光の強度を変えれば、数式 7 により、波長変換後の波長分割多重信号光の強度とそのチャンネルの近傍に生じる高次 4 光波混合による雑音強度の比を改善できる。

即ち、波長変換後の  $S/N$  は、励起光と波長変換前の波長分割多重信号光の強度を変化させる事で制御可能である。

以上では、波長分割多重信号光の周波数間隔を規定しなかったが、以下では、波長分割多重信号光のチャンネル周波数間隔が等しい場合の雑音について説明する

。

## 【 0 0 5 4 】

波長分割多重信号の周波数間隔は一般に I T U の周波数グリッドによって規定され、その間隔は等しい。この場合、高次 4 光波混合により発生した雑音も等しい周波数間隔で並ぶ。

## 【 0 0 5 5 】

$n$  チャンネルの波長分割多重信号光からなり、励起光周波数  $\omega_p$  と励起光に最も近い波長分割多重信号光の周波数  $\omega_1$  との間隔を  $\Delta\omega$ 、波長分割多重信号光同士の周波数間隔を  $\delta\omega$  とし、励起光に近い方から順に数えて  $i$  番目の波長分割多重信号光の周波数を  $\omega_{si}$  とすると、 $i$  番目の波長分割多重信号光の周波数  $\omega_{si}$  は数式 8 で与えられる。

波長分割多重信号光の周波数は励起光周波数よりも低いところにあるものとする。波長分割多重信号光の周波数は励起光周波数よりも高いところにあるとして、解析しても出てくる結論は変わらない。従って波長分割多重信号光の周波数は励起光周波数よりも低いところにあるものとしても、一般性を失わない。

## 【 0 0 5 6 】

数式 8

$$\omega_{si} = \omega_p - \Delta\omega - (i - 1) \cdot \delta\omega \quad (1 \leq i \leq n)$$

## 【 0 0 5 7 】

高次 4 光波混合によって生じる雑音の周波数  $\omega_{nji}$  は、数式 3 に数式 8 を代入すると数式 9 となる。 $\omega_{nji} \equiv \omega_{nk}$  と置いた。

数式 9

$$\omega_{nk} = \omega_p - (j - i) \cdot \delta\omega = \omega_p + k \delta\omega \quad (1 \leq i, j \leq n \quad i \neq j)$$

## 【 0 0 5 8 】

同じ周波数  $\omega_{nk}$  を生成する波長分割多重信号光チャンネル  $\omega_j$ 、 $\omega_i$  の組み合わせの数は、 $k = i - j$  を満足する  $(i, j)$  の組み合わせの数だけある。例えば、 $k = 1$  を満足する  $(i, j)$  の組み合わせの数は  $n - 1$  個あり、 $k = r$  を満足する  $(i, j)$  の組み合わせの数は  $n - r$  個である。

## 【0059】

雑音周波数は周波数軸上で、励起光周波数 $\omega_p$ を中心として対称に $\delta\omega$ の間隔で位置しており、励起光周波数 $\omega_p$ に近いほど同じ $k$ の値を与える $(i, j)$ の組み合わせ、即ち4光波混合前の波長分割多重信号光周波数 $\omega_j$ 、 $\omega_i$ の組み合わせの数が多いため、雑音周波数帯域内で高次4光波混合による変換効率がほぼ等しいとするならば、該雑音の強度は、励起光周波数 $\omega_p$ に近いほど大きくなる。

## 【0060】

絶対値 $|k|$ 同じ値を有する雑音周波数 $\omega_{nk}$ に寄与する4光波混合前の波長分割多重信号光周波数 $\omega_{sj}$ 、 $\omega_{si}$ の組み合わせは同じ組み合わせである。従って周波数 $\omega_{nk}$ の雑音の強度は、同じ $k$ の値を有する $(i, j)$ の組み合わせによる高次4光波混合による雑音の強度全ての和をとれば良い。

## 【0061】

周波数間隔が等しいチャンネルからなる波長分割多重信号光を一括波長変換変換する際に、高次4光波混合による $\omega_{nk}$ を持つ雑音の強度 $P_{nk}$ は、雑音周波数帯域で変換効率がほぼ等しいと仮定すれば、数式10で与えられる。

## 【数1】

数式10

$$P_{nk} = \beta \times P_p \sum P_{si} \times P_{sj} \quad (\Sigma \text{は } k = i - j \text{ を満足する全ての } (i, j) \text{ の組み合わせの } i, j \text{ について和をとる})$$

$$= (n - |k|) \times \beta \times P_p \times P_{si}^2 \quad (P_{si}, P_{sj} \text{ が等しい場合})$$

## 【0062】

各チャンネルの信号光の強度とチャンネル間の周波数間隔が等しい場合、励起光周波数 $\omega_p$ から $|k| \delta\omega$ の周波数の位置にある雑音の強度は、数式10から $(n - |k|)$ に比例する。

## 【0063】

波長多重信号光が $n$ 波ある場合、 $|k|$ は1から $n-1$ までの値を取るから、励起光周波数 $\omega_p$ を外れるにしたがって雑音強度は小さくなる。

波長変換後の波長分割多重信号光の強度と雑音強度の比を考慮することで、波長変換後の波長分割多重信号光の帯域と雑音の帯域を重ね合わせる事が可能になる



## 【 0 0 6 4 】

波長変換後の波長分割多重信号光の周波数と波長変換後の高次 4 光波混合による雑音との重なりについて具体的に説明する。

波長変換前の周波数  $\omega_{sk}$  の波長分割多重信号光が 4 光波混合によって周波数  $\omega_{csk} = 2\omega_p - \omega_{sk}$  の波長多重信号光に変換される。

周波数が  $\omega_{si}$ 、 $\omega_{sj}$  の波長分割多重信号光と周波数  $\omega_p$  の励起光から、高次 4 光波混合によって雑音が生じる。周波数  $\omega_p$  の励起光から周波数が高くなる方へ向かって  $k$  番目に位置する雑音の強度を  $P_{nk}$ 、4 光波混合変換後の周波数  $\omega_{csk}$  である波長分割多重信号光の強度を  $P_{csk}$  とする。

## 【 0 0 6 5 】

数式 5、数式 10 から数式 11 が誘導できる。

## 【 数 2 】

数式 11

$$P_{csk} / P_{nk} = \alpha P_p \times P_{sk} / \beta \sum_{i,j} P_{si} \times P_{sj} \text{ 又は}$$

$$P_{csk} / P_{nk} = \alpha P_p \times P_{sk} / (n - |k|) \times \beta \times P_{si}^2$$

数式 11 から波長変換後の波長分割多重信号光の強度と高次 4 光波混合による雑音の強度の比は、励起光の強度と波長変換前の波長分割多重信号光の強度の少なくとも 1 方を変える事によって、又は  $k = i - j$  を満足する全ての  $(i, j)$  に対する  $P_{si}$ 、 $P_{sj}$  と  $P_{sk}$  が等しい場合には励起光強度と波長変換前の波長分割多重信号光の強度の比を変えることによって制御できる。

続いて、励起光の周波数  $\omega_p$  から最も遠く離れた  $|k| = n - 1$  に位置する雑音周波数から励起光周波数  $\omega_p$  に向かって順に、 $|k| = n - 2, \dots, n - r$  までの雑音周波数を含む帯域が、波長変換後の波長分割多重信号光の周波数帯域に重なった場合の  $P_{csk} / P_{n|k|}$  を考察する。

$|k| = n - 1$  に位置する雑音周波数の  $P_{csk} / P_{n|n-1|}$  を基準にすると、 $|k| = n - r$  に位置する雑音は、 $P_{csk} / P_{n|n-r|}$  は  $10 \log r \text{ dB}$  だけ悪くなる

。

【0066】

$|n-r|\delta\omega$ が、励起光周波数と励起光周波数に最も近い波長分割多重信号光周波数 $\omega_{s1}$ との周波数間隔にほぼ等しい場合、周波数 $\omega_{cs1}$ は、 $|k|=n-r$ に位置する雑音周波数に一致するか、その近傍にある。

【0067】

同様に、 $(n-1)\delta\omega$ が励起光周波数と波長変換前の波長分割多重信号光の周波数 $\omega_{sk}$ との周波数間隔にほぼ等しい場合、励起光周波数から最も離れた雑音周波数、即ち周波数が $\omega_p \pm (n-1)\delta\omega$ の雑音と、波長分割多重信号光の周波数 $\omega_{sk}$ を波長変換した後の波長分割多重信号光チャンネル周波数 $\omega_{csk}$ が、一致するか、その近傍にある。この様な条件の場合、波長変換後の波長分割多重信号光の周波数 $\omega_{cs1}$ から $\omega_{csk}$ まで雑音周波数と重なり合う。

【0068】

従って波長変換後の波長分割多重信号光の帯域の中にもしくは近傍に生じる雑音の内、その強度が最大となる雑音の周波数は $\omega_p \pm (n-r)\delta\omega$ となる。そのため励起光周波数に最も近い波長変換後の波長分割多重信号光の周波数 $\omega_{cs1}$ が、 $n-r$ 番目に位置する雑音周波数に一致するか、その近傍にある場合には、 $P_{cs1}/P_{n(n-r)}$ を例えば30dB以上になるように、励起光の強度と波長変換前の波長分割多重信号光の強度を変える事によって補償すれば、波長変換後の波長多重信号光帯域内での波長多重信号光と高次4光波混合による雑音の比は30dB以上となる。

或いは $k=n-r$ を満足する全ての $(i, j)$ の組みあわせに対する $P_{si}$ 、 $P_{sj}$ と $P_{sk}$ が等しい場合には、励起光の強度と波長変換前における波長分割多重信号光の強度の比を変える事によって補償する。

そうすると4光波混合による波長変換後の励起光周波数に最も近い波長分割多重信号光チャンネル周波数 $\omega_{cs1}$ における $P_{cs1}/P_{n|n-r|}$ よりも、 $10\log r$  dBだけチャンネル周波数 $\omega_{csk}$ における $P_{csk}/P_{n|n-1|}$ は良くなっているから、波長変換後の波長分割多重信号光は全てのチャンネルに亘って $S/N$ が30dB以上を確保する事が出来る。

波長分割多重信号光の各チャンネルの強度が等しくなくても、波長分割多重信号光の各チャンネルの周波数間隔が等しい場合は、励起光周波数に近いほど雑音周波数の上に立つ雑音強度は大きいので、波長変換後の励起光周波数に最も近い周波数の波長分割多重信号光と雑音の周波数が一致する近傍で、 $S/N$ を（例えば 30 dB）確保しておけば、励起光周波数から離れた周波数の波長変換後の波長分割多重信号光チャンネルに対しては、 $S/N$ を（例えば 30 dB）確保する事が出来る事は明らかである。

【0069】

波長変換後の波長分割多重信号光と高次 4 光波混合による雑音とが、近傍に在ったり、重なったりする場合の  $S/N$  をどうするかを説明してきたが、次に、波長変換後の波長分割多重信号光と高次 4 光波混合による雑音を分離する本発明の波長変換方法について説明する。

一つ目の方法として、励起光周波数を中心として、雑音用の周波数帯域を用意し（以下ガードバンドと呼ぶ）、雑音の周波数帯域の外側に波長変換後の波長分割多重信号光の周波数帯域を用意し、雑音と波長変換後の波長分割多重信号光を分離する 4 光波混合による波長変換である。

周波数間隔が  $\delta\omega$  で等間隔の  $n$  チャンネルの波長分割多重信号光を波長変換した際に生じる高次 4 光波混合による雑音周波数  $\omega_{nk}$  が存在する周波数帯域は、 $|k|$  は 1 から  $n-1$  までの値を取る。その帯域は数式 12 で与えられる。

【0070】

数式 12

$$\omega_p - (n-1) \times \delta\omega \leq \omega_{nk} \leq \omega_p + (n-1) \times \delta\omega$$

【0071】

波長変換前の、周波数間隔が  $\delta\omega$  で等間隔な  $n$  チャンネルの波長分割多重信号光周波数  $\omega_{sk}$  が波長変換され周波数  $\omega_{csk}$  の波長分割多重信号光が存在する周波数帯域は、数式 2、数式 8 により数式 13 によって与えられる。

数式 13

$$\omega_p + \Delta\omega \leq \omega_{csk} \leq \omega_p + \Delta\omega + (n-1) \times \delta\omega$$

【0072】

高次 4 光波混合による周波数  $\omega_{nk}$  の雑音は、波長分割多重信号のチャンネル間の周波数間隔  $\delta \omega$  と等しい間隔で励起光周波数  $\omega_p$  の両側に、該信号の周波数帯域幅  $(n-1) \times \delta \omega$  を占めるまで広がっている。

【0073】

一方励起光周波数  $\omega_p$  と励起光周波数に最も近い波長分割多重信号周波数の周波数間隔  $\Delta \omega$  であり、波長分割多重信号光の周波数帯域幅  $(n-1) \times \delta \omega$  をもつ波長分割多重信号光を波長変換した後の波長分割多重信号光は、励起光周波数  $\omega_p$  を中心にして波長変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域と反対側に存在し、励起光周波数  $\omega_p$  から  $\Delta \omega$  だけ離れた周波数から更に周波数帯域幅  $(n-1) \times \delta \omega$  まで、 $\delta \omega$  の等周波数間隔で広がっている。

【0074】

励起光周波数  $\omega_p$  よりも低周波にある、波長変換前の波長分割多重信号光と波長変換後の波長分割多重信号光と雑音の周波数配置を図 4 に模式的に示す。

【0075】

高次 4 光波混合による雑音周波数  $\omega_{nk}$  が存在する周波数帯域と波長変換された波長分割多重信号光チャンネル周波数  $\omega_{csk}$  が存在する周波数帯域が重ならないためには、波長変換後における波長分割多重信号光の周波数帯域の下限が雑音周波数帯域の上限よりも大きいか等しければ良い。

数式 12、数式 13 を用いてこの条件を当てはめると数式 14 が得られる。

数式 14

$$\Delta \omega \geq (n-1) \times \delta \omega$$

即ち数式 14 は、励起光周波数  $\omega_p$  と励起光周波数に最も近い波長分割多重信号の周波数との周波数間隔  $\Delta \omega$  が波長分割多重信号光の周波数帯域幅より大きいか、等しい時に波長変換後の波長分割多重信号光の周波数帯域と高次 4 光波混合による雑音の周波数帯域が重ならない事を意味する。

【0076】

周波数  $\omega_p$  の励起光と励起光の周波数に最も近い波長分割多重信号光の周波数との周波数間隔  $\Delta \omega$  が規定されているならば、高次 4 光波混合による雑音と波長変換された波長分割多重信号光の周波数帯域が重ならないためには、波長変換前の波

長分割多重信号光の周波数帯域幅は、 $\Delta \omega$  を上限にしなければならない。

【0077】

周波数間隔が  $\delta \omega$  と等しい波長分割多重信号光の最大チャンネル数  $n$  は、

数式 15

$$\Delta \omega = (n - 1) \times \delta \omega$$

を満足する  $n$  によって決まり、 $\Delta \omega$  が波長分割多重信号光の周波数帯域幅の最大値となる。

【0078】

周波数  $\omega_p$  の励起光と励起光の周波数に最も近い波長分割多重信号の周波数との周波数間隔  $\Delta \omega$  を、波長分割多重信号光の周波数帯域幅を等しくした場合、励起光周波数  $\omega_p$  から励起光周波数  $\omega_p$  に対して最も離れている 4 光波混合変換後の波長分割多重信号光チャンネル周波数迄の周波数帯域幅を  $F \omega$  とすると、数式 16 で与えられる。

数式 16

$$\Delta \omega = (n - 1) \times \delta \omega = F \omega / 2$$

【0079】

数式 16 を満たす場合、波長変換後の波長分割多重信号光は励起光周波数から  $\Delta \omega$  離れた帯域に変換され、高次 4 光波混合波長変換による雑音は励起光から  $\Delta \omega$  の帯域内にのみ発生する。この励起光を方端とする  $\Delta \omega$  の帯域をガードバンドとする。この様な励起光を一本起てる方法を 1 励起光波長変換方法と呼ぶ事にする。

実施例 1 として、零分散波長 1564 nm の高非線型ファイバ HNL-DSF (分散シフトファイバ) 100 m を使用し、励起光周波数  $\omega_p$  を 191.7 THz、ガードバンドを 3.4 THz に設定して、波長分割多重信号光が等周波数間隔 (0.21 THz) でチャンネル数が 18 の C 帯にある波長分割多重信号光を、L 帯に波長変換した際のスペクトルを図 5 に示す。

4 光波混合の変換効率を大きくする為には、励起光周波数  $\omega_p$  はなるべく変換媒質の零分散波長に相当する周波数に等しいか、その近傍に置いた方が良い。

【0080】

4 光波混合による波長変換後の信号帯域と高次 4 光波混合による雑音周波数帯域が重ならない様子が示されている。波長変換後の信号と高次 4 光波混合による雑音の  $S/N$  は 30 dB 以上示している事から、ガードバンドを設定した 4 光波混合による波長変換を利用する事で、高次 4 光波混合によって生じる雑音による品質劣化を受けない波長変換方法が実現できた。

【0081】

ガードバンドを設定する 4 光波混合による波長変換によると、波長変換しようとする波長分割多重信号光の周波数帯域幅を制限したり、励起光周波数  $\omega_p$  周りにガードバンドを設定する為に、伝送に使用できる周波数帯域がガードバンド設定分の周波数帯域分だけ減じる為、伝送に使用できる周波数帯域を励起光周波数  $\omega_p$  から励起光周波数  $\omega_p$  に対して最も離れている 4 光波混合変換後の波長分割多重信号光チャンネル周波数迄の周波数帯域幅とすると、伝送に使用できる周波数帯域は半減してしまう。

【0082】

一般に波長分割多重信号光を励起光周波数  $\omega_p$  の 4 光波混合による波長変換を行うと雑音周波数は、励起光周波数  $\omega_p$  を中心にして対称に形成される。雑音周波数は励起光周波数  $\omega_p$  から波長分割多重信号光を形成するチャンネルの内最小なチャンネル周波数間隔分だけ離れた位置から始まって、或いはチャンネル間の周波数間隔  $\delta\omega$  が同じ波長分割多重信号光の場合には励起光周波数  $\omega_p$  から  $\delta\omega$  分だけ離れた位置から始まって、励起光周波数  $\omega_p$  から波長分割多重信号光周波数帯域幅分だけ離れた位置で無くなる。

【0083】

励起光周波数  $\omega_p$  から波長分割多重信号光周波数帯域幅分だけ離れた周波数位置まで設定されたガードバンド分の周波数帯域を伝送に使用できる周波数帯域にするには、あらたな波長変換方法を考案する必要がある。

以上の目的を達成する為に、周波数が異なる二つの励起光を用いた四光波混合現象による波長変換方法に雑音用帯域としてガードバンドを設定する波長変換法を発明した。

【0084】

4 光波混合による波長変換を行うと、それぞれが異なる周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  を持つ 2 つの励起光の平均周波数位置を中心として数式 2 による波長分割多重信号光の 4 光波混合による変換が行なわれ、2 つの励起光周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  のそれぞれを中心として数式 3 による高次 4 光波混合によって生じる雑音周波数が生じる。

【0085】

周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  を持つ 2 つの励起光の平均周波数を 4 光波混合による波長変換を行う変換媒質の零分散波長に相当する周波数に合わせ、4 光波混合による波長変換の効率を上げる。この理由は後から説明する。

【0086】

4 光波混合による波長変換を行う変換媒質の零分散波長での周波数を  $\omega_0$  とし、周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数を  $\omega_0$  に合わせ、 $\omega_0$  を中心とした両側の方端に励起光周波数  $\omega_{p1}$  を、他の方端に励起光周波数  $\omega_{p2}$  を設定する。

【0087】

周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数を変換媒質の零分散波長での周波数  $\omega_0$  として、 $\omega_0$  から励起光周波数  $\omega_{p1}$ 、励起光周波数  $\omega_{p2}$  迄の周波数帯域を変換帯域  $Fw$  として、波長変換後の波長分割多重信号光のチャンネルと高次 4 光波混合によって生じる雑音周波数が重ならないように  $Fw$  を決定する。

【0088】

励起光周波数  $\omega_{p1}$ 、励起光周波数  $\omega_{p2}$  は、 $\omega_{p1} < \omega_{p2}$  として数式 17、数式 18 で与えられる。

数式 17

$$\omega_{p1} = \omega_0 - Fw$$

数式 18

$$\omega_{p2} = \omega_0 + Fw$$

【0089】

周波数間隔が等間隔な  $n$  チャンネルの波長分割多重信号光からなり、励起光周波数  $\omega_p$  と励起光周波数  $\omega_p$  に最も近い波長分割多重信号光のチャンネル周波数との周波数間隔を  $d\omega$ 、波長分割多重信号光のチャンネル周波数間隔  $\delta\omega$  とし、2 つの励起光周波数平均に近い方から順に数えて  $i$  番目の波長分割多重信号光チャン

ネルの周波数を  $\omega_{si}$  とする。波長変換前の周波数  $\omega_{si}$  の波長分割多重信号光チャンネルが 4 光波混合によって波長変換され、波長変換後の波長分割多重信号光チャンネル周波数  $\omega_{csi}$  とする。

【0090】

波長変換前の周波数  $\omega_{si}$  の波長分割多重信号光チャンネルに対して、周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数を中心にして生じる、波長変換後の、波長分割多重信号光チャンネル周波数  $\omega_{csi}$  は数式 19 で与えられる。波長分割多重信号光の各チャンネル周波数は周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数よりも低いところにあるものとした。波長分割多重信号光の各チャンネル周波数が周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数よりも高いところにあるとして、解析しても出てくる結論は変わらない。従って波長分割多重信号光の各チャンネル周波数は周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数よりも低いところにあるものとしても、一般性を失わない。

数式 19

$$\omega_{csi} = \omega_{p1} + \omega_{p2} - \omega_{si} = 2\omega_0 - \omega_{si}$$

【0091】

波長変換前の波長分割多重信号光チャンネルの周波数  $\omega_{si}$ 、 $\omega_{sj}$  と励起光周波数  $\omega_{p1}$  によって生じる高次 4 光波混合による雑音  $\omega_{njip1}$  は数式 20 によって与えられる。

数式 20

$$\omega_{njip1} = \omega_{p1} + \omega_{sj} - \omega_{si} \quad (j \neq i)$$

【0092】

波長変換前の波長分割多重信号光チャンネルの周波数  $\omega_{si}$ 、 $\omega_{sj}$  と励起光周波数  $\omega_{p2}$  によって生じる高次 4 光波混合による雑音  $\omega_{njip2}$  は数式 21 によって与えられる。

数式 21

$$\omega_{njip2} = \omega_{p2} + \omega_{sj} - \omega_{si} \quad (j \neq i)$$

【0093】

波長変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域を周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起



光の平均周波数  $\omega_0$  と励起光周波数  $\omega_{p1}$  の間に置くと、 $i$  番目の波長分割多重信号光チャンネル周波数  $\omega_{si}$  は数式 2 2 で与えられる。

数式 2 2

$$\omega_{si} = \omega_0 - d\omega - (i-1) \times \delta\omega \quad (1 \leq i \leq n)$$

【0094】

波長変換前の周波数  $\omega_{si}$  の波長分割多重信号光チャンネルに対して、周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数を中心にして生じる、波長変換後の、波長分割多重信号光チャンネル周波数  $\omega_{csi}$  は数式 1 9 で与えられるから、数式 2 2 を数式 1 9 に代入して数式 2 3 が得られる。

数式 2 3

$$\omega_{csi} = \omega_0 + d\omega + (i-1) \times \delta\omega$$

【0095】

波長変換前の波長分割多重信号光チャンネルの周波数  $\omega_{si}$ 、 $\omega_{sj}$  と励起光周波数  $\omega_{p1}$  によって生じる高次 4 光波混合による雑音  $\omega_{njip1}$  は数式 2 1 によって与えられるから、数式 2 2 を数式 2 0 に代入して数式 2 4 が得られる。

数式 2 4

$$\omega_{njip1} = \omega_{p1} + (i-j) \times \delta\omega$$

【0096】

波長変換前の波長分割多重信号光チャンネルの周波数  $\omega_{si}$ 、 $\omega_{sj}$  と励起光周波数  $\omega_{p2}$  によって生じる高次 4 光波混合による雑音  $\omega_{njip2}$  は数式 2 1 によって与えられるから、数式 2 2 を数式 2 1 に代入して数式 2 5 が得られる。

数式 2 5

$$\omega_{njip2} = \omega_{p2} + (i-j) \times \delta\omega$$

【0097】

$n$  チャンネルの周波数間隔が等間隔な波長分割多重信号光であるから、 $1 \leq i \leq n$ 、 $1 \leq j \leq n$  であり、 $k = i - j$  と置くと  $|k|$  は 1 から  $n-1$  までの値を取る。高次 4 光波混合によって生じる雑音周波数は  $\omega_{njip1}$ 、 $\omega_{njip2}$  であるから、数式 2 4、数式 2 5 により雑音周波数  $\omega_{njip1}$ 、 $\omega_{njip2}$  の周波数帯域は数式 2 6、数式 2 7 によって与えられる。

数式 2 6

$$\omega_{p1} - (n-1) \times \delta \omega \leq \omega_{nji p1} \leq \omega_{p1} + (n-1) \times \delta \omega$$

数式 2 7

$$\omega_{p2} - (n-1) \times \delta \omega \leq \omega_{nji p2} \leq \omega_{p2} + (n-1) \times \delta \omega$$

【0 0 9 8】

波長変換前の波長分割多重信号光チャンネル周波数  $\omega_{si}$  に対して、周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数を中心にして生じる、波長変換後の、波長分割多重信号光チャンネル周波数  $\omega_{csi}$  は数式 2 3 で与えられるから、変換後の波長分割多重信号光周波数は周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  から  $d\omega$  離れた周波数に始まり、その周波数帯域幅は変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域と同じである。

【0 0 9 9】

一方雑音周波数は数式 2 6、数式 2 7 で与えられるから、 $\omega_{p1}$  を中心とした雑音周波数は  $\omega_{p1}$  を中心対称にして、両側に変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域幅だけ広がって終わり、その周波数帯域幅は変換前の波長分割多重信号光周波数帯域幅の 2 倍である。 $\omega_{p2}$  を中心とした雑音周波数は  $\omega_{p2}$  を中心対称にして、両側に変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域幅だけ広がって終わり、その周波数帯域幅は変換前の波長分割多重信号光周波数帯域幅の 2 倍である。

【0 1 0 0】

変換前の波長分割多重信号光は、周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  と励起光周波数  $\omega_{p1}$  の間に入っているから、波長変換後の波長分割多重信号光は周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  と励起光周波数  $\omega_{p2}$  の間に入っている。波長変換前の波長分割多重信号に対して、周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数を中心にして生じる、波長変換後の波長分割多重信号光チャンネル周波数  $\omega_{csi}$  の上限、最も高い周波数  $\omega_{csisup}$  は数式 2 3 により、数式 2 8 で与えられる。

数式 2 8

$$\omega_{csisup} = \omega_0 + d\omega + (n-1) \times \delta \omega$$

【0 1 0 1】

励起光周波数  $\omega_{p2}$  と波長分割多重信号光チャンネル  $\omega_{sj}$ 、 $\omega_{si}$  とによる高次 4 光波混合による雑音周波数の下限、最も低い周波数  $\omega_{njip2inf}$  は数式 27 により、数式 29 で与えられる。

数式 29

$$\omega_{njip2inf} = \omega_{p2} - (n-1) \times \delta\omega$$

【0102】

励起光周波数  $\omega_{p2}$  と波長変換前の波長分割多重信号光チャンネル  $\omega_{sj}$ 、 $\omega_{si}$  とによる高次 4 光波混合による雑音周波数の下限  $\omega_{njip2inf}$  よりも、波長変換前の波長分割多重信号光チャンネル周波数  $\omega_{csi}$  に対して、周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数を中心にして生じる、波長変換後の、波長分割多重信号光チャンネル周波数  $\omega_{csi}$  の上限  $\omega_{csisup}$  が小さければ、周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  と励起光周波数  $\omega_{p2}$  の間に入っている、雑音周波数と波長変換後の波長分割多重信号光チャンネル周波数は重ならない。

【0103】

従って  $\omega_{csisup} < \omega_{njip2inf}$  より、数式 30 が成立する。

数式 30

$$Fw = \omega_{p2} - \omega_0 > d\omega + 2(n-1) \times \delta\omega$$

【0104】

周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  と周波数間隔が最も小さい波長変換前の波長分割多重信号光チャンネルと周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  との周波数間隔  $d\omega$  は、理想的には無限小にとれるから、数式 29 によって、励起光周波数  $\omega_{p2}$ 、 $\omega_{p1}$  と周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  の周波数間隔  $Fw$  が、波長変換前の波長分割多重信号光周波数帯域幅の少なくとも 2 倍以上在れば、波長変換後の波長分割多重信号光チャンネル周波数と高次 4 光波混合による雑音周波数は重ならない。

【0105】

波長変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域を周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  と励起光周波数  $\omega_{p1}$  の間に置いて、変換媒質の零分散波長での周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  から励起光周波数  $\omega_{p1}$ 、及

び励起光周波数  $\omega_{p2}$  迄の周波数帯域を変換帯域  $Fw$  として、波長変換後の波長分割多重信号光のチャンネルと高次 4 光波混合によって生じる雑音周波数が重ならないように  $Fw$  を決定した議論が、波長変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域を周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  と励起光周波数  $\omega_{p2}$  の間に置き、波長変換後の波長分割多重信号光のチャンネルと高次 4 光波混合によって生じる雑音周波数が重ならないような  $Fw$  の周波数帯域幅を決定した議論についても、数式 19、数式 20、数式 21 が成立するから、同様な議論が成り立ち、この  $Fw$  の周波数帯域幅は、波長変換前の波長分割多重信号光周波数帯域幅の少なくとも 2 倍以上必要である。

## 【0106】

チャンネル間隔の等しくない波長分割多重信号光についても、数式 19、数式 20、数式 21 が成立する。数式 19 からは、周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  を中心にした両側のどちらか一方側にある周波数軸上の波長変換前の波長分割多重信号光に対して、波長変換後の波長分割多重信号光は、他の側の周波数軸上に在る。又、周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  と周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  に最も近い波長変換前の波長分割多重信号光チャンネルとの間の周波数間隔だけ、周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  から離れて、波長変換後の波長分割多重信号光は始まり、その周波数帯域幅は波長変換前の波長分割多重信号光周波数帯域幅と同じである。

## 【0107】

波長変換前の波長分割多重信号光チャンネルの周波数  $\omega_{si}$ 、 $\omega_{sj}$  と励起光周波数  $\omega_{p1}$  によって生じる高次 4 光波混合波長変換による雑音  $\omega_{njp1}$  に対しては、数式 20 が成立する。及び波長変換前の波長分割多重信号光チャンネルの周波数  $\omega_{si}$ 、 $\omega_{sj}$  と励起光周波数  $\omega_{p2}$  によって生じる波長変換による雑音  $\omega_{njp2}$  に対しては数式 21 が成立する。

## 【0108】

従って  $\omega_{p1}$  を中心とした雑音周波数は  $\omega_{p1}$  を中心対称にして両側に変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域幅だけ広がって終わり、その周波数帯域幅は変換前

の波長分割多重信号光周波数帯域幅の2倍である。 $\omega_{p2}$ を中心とした雑音周波数は $\omega_{p2}$ を中心対称にして両側に変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域幅だけ広がって終わり、その周波数帯域幅は変換前の波長分割多重信号光周波数帯域幅の2倍である。

## 【0109】

周波数間隔 $\delta\omega$ が等間隔なチャンネルから成る波長分割多重信号光に対しては、励起光 $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$ に最も近い雑音周波数は、 $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$ を中心にした両側の周波数軸上で、励起光周波数から、周波数距離 $\delta\omega$ に位置する。一方、周波数間隔が不等間隔なチャンネルからなる波長分割多重信号光に対しては、励起光 $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$ に最も近い雑音周波数は、 $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$ を中心にした両側の周波数軸上に在り、周波数間隔が不等間隔なチャンネルから成る波長分割多重信号光の内、周波数間隔が最も狭いチャンネル間の周波数間隔だけ、それぞれの励起光周波数から離れて位置している。従って周波数間隔が不等間隔なチャンネルからなる波長分割多重信号光に対しても、周波数間隔が等間隔なチャンネルからなる波長分割多重信号光に対しても、 $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$ に最も近い雑音周波数の周波数軸上の位置が異なるだけであり、雑音周波数の周波数分布は、 $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$ を中心にした両側の周波数軸上に在り、 $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$ を中心にして波長変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域幅だけ広がっている事は同様である。

## 【0110】

従って、波長変換後の波長分割多重信号光のチャンネルと高次4光波混合によって生じる雑音周波数が重ならないようなFwの周波数帯域幅は、少なくとも波長変換前の波長分割多重信号光の2倍以上必要である。この様な波長変換方法を2励起光波長変換方法と呼ぶ。

## 【0111】

波長変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域を周波数 $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$ の2つの励起光の平均周波数 $\omega_0$ と励起光周波数 $\omega_{p1}$ の間に置いて、4光波混合による波長変換を行う場合、周波数 $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$ の2つの励起光の平均周波数 $\omega_0$ を4光波混合による波長変換を行う媒質の零分散波長に相当する周波数に合わせる理由を述べる。励起光周波数 $\omega_{p2}$ 、 $\omega_{p1}$ 、波長変換前の波長分割多重信号光のチャンネル $\omega$

$\omega_{si}$ 、このチャンネルに対して周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  を中心対称とした 4 光波混合による波長変換された後の波長分割多重信号光のチャンネル  $\omega_{csi}$  とすると、これらの周波数  $\omega_{p2}$ 、 $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{si}$ 、 $\omega_{csi}$  に相当する 4 光波混合による波長変換を行う媒質を伝播する伝播定数を、 $\beta_{p2}$ 、 $\beta_{p1}$ 、 $\beta_{si}$ 、 $\beta_{csi}$  とすると、位相整合条件  $\Delta\beta = \beta_{p1} + \beta_{p2} - \beta_{si} - \beta_{csi}$  となる。 $\beta_{p2}$ 、 $\beta_{p1}$  は  $\omega_0$  を中心とした互いに対称の周波数軸上の位置にあり、従って  $\beta_{p2}$ 、 $\beta_{p1}$  の周波数軸上の位置は、 $\omega_0$  から  $\omega_{p2}$ 、 $\omega_{p1}$  迄の周波数軸上の距離  $\Delta\omega_1$  は等しく、 $\omega_0$  を零とする周波数軸上で符号が異符号のところにある。同様に  $\beta_{si}$ 、 $\beta_{csi}$  は  $\omega_0$  を中心とした互いに対称の周波数軸上の位置にあり、従って  $\beta_{si}$ 、 $\beta_{csi}$  の周波数軸上の位置は、 $\omega_0$  から  $\omega_{si}$ 、 $\omega_{csi}$  迄の周波数軸上の距離  $\Delta\omega_2$  は等しく、 $\omega_0$  を零とする周波数軸上で符号が異符号のところにある。以上説明した条件で、 $\Delta\beta$  を  $\omega_0$  の周りでテイラー展開式に代入すると、 $(\Delta\omega_2)^2$  及び  $(\Delta\omega_2)^4$  など  $(\Delta\omega_1)$  の偶数幂が、残る。 $(\Delta\omega_1)^2$ 、 $(\Delta\omega_2)^2$  に対するテイラー展開の係数は 4 光波混合による波長変換を行う媒質の零分散波長に相当する周波数  $\omega_0$  に於ける、分散値なので、零である。従って  $(\Delta\omega_1)$ 、 $(\Delta\omega_2)$  の 4 次以上の偶数幂が、残る。従って  $(\Delta\omega_1)$ 、 $(\Delta\omega_2)$  の 4 次以上の偶数幂が無視できるほど小さければ、 $\Delta\beta$  が零になる。 $\Delta\beta$  が小さくなるほど 4 光波混合による波長変換効率が良くなる事が知られているので、以上説明した事から、4 光波混合による波長変換を行う媒質の零分散波長に相当する周波数に 4 光波混合による波長変換後の波長多重チャンネルの周波数が近いほど、4 光波混合による波長変換効率が良くなる。

#### 【0 1 1 2】

図 6 には励起光周波数  $\omega_{p2}$ 、 $\omega_{p1}$ 、周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$ 、周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  と励起光周波数  $\omega_{p1}$  の間の周波数に配置されている、波長変換前の波長分割多重信号光チャンネル周波数、波長変換後の波長分割多重信号光チャンネル周波数、高次 4 光波混合による雑音周波数が模式的に示されている。

#### 【0 1 1 3】

以上述べたように、ガードバンド内に波長変換後の波長分割多重信号光を配置し

、ガードバンド外に高次 4 光波混合波長変換による雑音周波数を配置する実施例 2 として、零分散波長 1 5 6 4 n m の高非線型屈折率ファイバ H N L - D S F (分散シフトファイバ) 1 0 0 m を使用し、励起光周波数  $\omega_{p1}$  (1 8 7 . 9 T H z)、励起光周波数  $\omega_{p2}$  (1 9 5 . 3 T H z) 周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  の 2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  (1 9 1 . 6 T H z)、ガードバンド (1 . 8 T H z) に設定して、チャンネルの等周波数間隔 (0 . 2 T H z)、チャンネル数 (7) の C 帯にある波長分割多重信号光を L 帯に 4 光波混合による波長変換した実験例が図 7 に示されている。

#### 【0 1 1 4】

一つの励起光周波数を中心とした周波数軸上の、どちらか一方の側に波長変換前の波長分割多重信号光を配置し、励起光周波数を中心とした周波数軸上の、他の側に波長変換後の波長分割多重信号光をガードバンド  $F w / 2$  外に配置し、高次 4 光波混合による雑音周波数をガードバンド内に配置する、4 光波混合波長変換する方法と、二つの励起光周波数の平均周波数を中心とした周波数軸上の、どちらか一方の側に在る励起光周波数と 2 つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数の間に波長変換前の波長分割多重信号光を配置し、2 つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数を中心とした周波数軸上の、他の側に波長変換後の波長分割多重信号光をガードバンド  $F w / 2$  内に配置し、高次 4 光波混合による雑音周波数をガードバンド外に配置し、波長変換する方法を説明した。

#### 【0 1 1 5】

これらの二つの方法は、波長分割多重信号光を 4 光波混合による波長変換を行うと、信号周波数帯域と雑音周波数帯域は分離されているが、高次 4 光波混合による雑音に伴い、雑音周波数の周波数帯域まで考慮すると、効率の良い光周波数帯域を利用する波長変換方法とは言えない。

#### 【0 1 1 6】

そこで波長分割多重信号光を 2 つの周波数帯に分割し、1 つの励起光を起てる方法であって、分割された信号の内、励起光周波数から最も遠く離れた周波数成分を含む一方に対して波長変換を行い、ガードバンド外に波長変換後の信号を配置し、ガードバンド内に雑音周波数を配置し、ガードバンド内の雑音周波数を光フ

フィルタでカットする。4 光波混合による波長変換方法のガードバンドは、励起光周波数と、分割された信号の最も近いチャンネルとの周波数間隔が、波長分割多重信号光の周波数帯域幅以上に成るように設定される。

【 0 1 1 7 】

異なる周波数を持つ励起光を 2 個起てる方法であって、励起光を 1 個起てる方法で分割されたもう一方の信号を、2 つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数のまわりに波長変換する方法で、その平均周波数は、一つの励起光を利用した該波長変換方法に用いられる励起光周波数に一致させる。

【 0 1 1 8 】

2 つの波長変換器を並列に配置し、雑音を消去した上で合波すれば、合波器の出力は雑音の伴わない波長分割多重信号光となり、雑音の無い 4 光波混合による波長変換が実現できる。即ち雑音の無い、有効な光波長周波数帯域を使用する事が出来る 4 光波混合による波長変換を実現するには、1 つの励起光周波数を起てる方法と、2 つの励起光の周波数平均が、前記 1 つの励起光周波数に等しい 2 つの異なる励起光周波数を起てる方法とを併用する。

波長変換前の波長分割多重信号光を 2 つの周波数帯域に分波器 1 によって分け、前記 1 つの励起光周波数と最も遠くに在る周波数成分を含む波長分割多重信号光と、2 つの励起光の周波数平均と最も近くに在る周波数成分を含む波長分割多重信号光とに分ける。分けられた前記 1 つの励起光周波数と最も遠くに在る周波数成分を含む波長分割多重信号光の周波数帯域を励起光の周波数を中心とする周波数軸上の所定の一方側（4 光波混合による波長変換したい周波数を持つ信号に対して励起光の周波数を中心とする周波数軸上の反対側）に配置し、この波長分割多重信号光の周波数帯域幅以上にガードバンドの周波数帯域幅が設定され、ガードバンド外に 4 光波混合による波長変換後の波長分割多重信号光を配置し、ガードバンド内に雑音を配置する方法による波長変換器 2 と波長変換器 2 によって波長分割多重信号と分離された雑音周波数を光フィルタ 4 でカットする。

一方ガードバンド外に 4 光波混合による波長変換後の波長分割多重信号光を配置する該励起光周波数に等しい 2 つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数と、2 つの異なる周波数を持つ励起光の内、所定の一方の（4 光波混合による波長変



換したい周波数を持つ信号に対して励起光の平均周波数を中心とする周波数軸上の反対側に在る) 励起光周波数との間に形成される周波数帯域の内部に、分割された波長分割多重信号の内、2つの励起光の周波数平均と最も近くに在る周波数成分を含む波長分割多重信号光周波数帯域が入るように設置され、ガードバンド内に4光波混合による波長変換後の波長分割多重信号光を配置し、分割された波長分割多重信号の内、2つの励起光の周波数平均と最も近くに在る周波数成分を含む波長分割多重信号光周波数帯域以上を占めるガードバンドを設定し、分割された波長分割多重信号の内、2つの励起光の周波数平均と最も近くに在る周波数成分を含む波長分割多重信号光の4光波混合波長変換後の波長分割多重信号光周波数帯域外に雑音を配置する方法による波長変換器3と波長変換器3によって波長分割多重信号と分離された雑音周波数を光フィルタ5でカットする。

これらの方法による波長変換器を2つ組み合わせて、合波器6で合波すれば、有効な光波長周波数帯域を使用する事が出来る。分波器、合波器としては、アレー導波路形合分波器や、マッハツエンダー形合分波器等がある。

#### 【0119】

上記の実施例3としてC帯に在る周波数帯域192THzから195THz、チャンネルの等周波数間隔200GHz、チャンネル数16の波長分割多重信号光をL帯にある周波数帯域187THzから190THz、チャンネルの等周波数間隔200GHz、チャンネル数16の波長分割多重信号光に変換する方法について述べる。周波数帯域192THzから195THzの波長分割多重信号光を光フィルタ又は分波器1で、等周波数間隔200GHz、チャンネル数8の、周波数帯域192THzから193.4THzと周波数帯域193.6THzから195THzの二つの波長分割多重信号光に分割する。ガードバンド外に4光波混合による波長変換後の波長分割多重信号光を起てる為に、励起光周波数を191THzに起て、ガードバンドを2.6THzに設定し、分割された一方の周波数帯域193.6THzから195THzの波長分割多重信号光をガードバンド外に4光波混合による波長変換を行い、等周波数間隔200GHz、チャンネル数8の、周波数帯域187THzから188.4THzの波長分割多重信号光とし、ガードバンド内に励起光周波数191THzを中心として周波数189.6

THz から 192.4 THz まで広がる雑音周波数を配置し、4 光波混合波長変換前の波長分割多重信号光が 4 光波混合作用を生じる波長変換媒質通過後の位置に配置された後光フィルタ 4 で 189.6 THz 以上の雑音周波数をカットする波長変換器 2 と、分割されたもう一方の周波数帯域 192 THz から 193.4 THz の波長分割多重信号光に対しては、二つの励起光周波数の平均が、191 THz に起つように決める。例えば一の励起光周波数は 187 THz 以下、もう一つの励起光周波数は 195 THz 以上にする。本実施例では一の励起光周波数は 187 THz、もう一つの励起光周波数は 195 THz とする。ガードバンドを 2 THz に設定し、周波数帯域 192 THz から 193.4 THz の波長分割多重信号光をガードバンド内に 4 光波混合による波長変換を行い、等周波数間隔 200 GHz、チャンネル数 8 の、周波数帯域 188.6 THz から 190 THz の波長分割多重信号光とし、ガードバンド外に励起光周波数 187 THz を中心として周波数帯域 185.6 THz から 188.4 THz まで広がる雑音周波数と励起光周波数 195 THz を中心として周波数帯域 193.6 THz から 196.4 THz まで広がる雑音周波数配置し、4 光波混合波長変換前の波長分割多重信号光が 4 光波混合作用を生じる波長変換媒質通過後の位置に配置されたバンドパス光フィルタ 5 で 4 光波混合による波長変換後の周波数帯域 188.6 THz から 190 THz の波長分割多重信号光を抽出し、雑音をカットする波長変換器 3 を、並列に接続して合波器 6 で合波すれば、雑音の伴わない 4 光波混合による波長変換後の周波数帯域 187 THz から 190 THz の等周波数間隔 200 GHz、チャンネル数 16 の波長分割多重信号光を得る事ができ、有効な光周波数帯域が活用可能な波長変換器ができる。図 8 には、雑音の伴わない 4 光波混合による波長変換器の模式図が示されている。

#### 【0120】

実施例 3 として C 帯に在る波長分割多重信号光を、4 光波混合による波長変換によって、L 帯に雑音を伴わずに変換したが、L 帯に在る波長分割多重信号光を、4 光波混合による波長変換によって、C 帯に雑音を伴わずに変換する事が出来る。変換方法は C 帯に在る波長分割多重信号光を、4 光波混合による波長変換によって、L 帯に変換した実施例の 3 の逆過程をたどれば良い。

【 0 1 2 1 】

実施例 4 として、例えば L 帯に在る周波数帯域 1 8 7 T H z から 1 9 0 T H z の等周波数間隔 2 0 0 G H z、チャンネル数 1 6 の波長分割多重信号光を C 帯にある周波数帯域 1 9 2 T H z から 1 9 5 T H z、チャンネルの等周波数間隔 2 0 0 G H z、チャンネル数 1 6 の波長分割多重信号光に変換する方法について述べる。

周波数帯域 1 8 7 T H z から 1 9 2 T H z の波長分割多重信号光を光フィルタ又は分波器 1 で、等周波数間隔 2 0 0 G H z、チャンネル数 8 の周波数帯域 1 8 7 T H z から 1 8 8 . 4 T H z と周波数帯域 1 8 8 . 6 T H z から 1 9 0 T H z の二つの波長分割多重信号光に分割する。ガードバンド外に 4 光波混合による波長変換後の波長分割多重信号光を起てる為に、励起光周波数を 1 9 1 T H z に起て、ガードバンドを 1 . 4 T H z に設定し、分割された一方の周波数帯域 1 8 7 T H z から 1 8 8 . 4 T H z の波長分割多重信号光をガードバンド外に 4 光波混合による波長変換を行い、等周波数間隔 2 0 0 G H z、チャンネル数 8 の、周波数帯域 1 9 3 . 6 T H z から 1 9 5 T H z の波長分割多重信号光とし、ガードバンド内に励起光周波数 1 9 1 T H z を中心として周波数 1 8 9 . 6 T H z から 1 9 2 . 4 T H z まで広がる雑音周波数を配置し、4 光波混合波長変換前の波長分割多重信号光が 4 光波混合作用を生じる波長変換媒質通過後の位置に配置された後光フィルタ 4 で 1 9 2 . 4 T H z 以下の雑音周波数をカットする波長変換器 2 と、分割されたもう一方の周波数帯域 1 8 6 T H z から 1 9 0 T H z の波長分割多重信号光に対しては、二つの励起光周波数の平均が 1 9 1 T H z に起つように決める。例えば一の励起光周波数は 1 8 7 T H z 以下、もう一つの励起光周波数は 1 9 5 T H z 以上にする。本実施例では一の励起光周波数は 1 8 7 T H z、もう一つの励起光周波数は 1 9 5 T H z とする。ガードバンドを 1 . 4 T H z に設定し、周波数帯域 1 8 8 . 6 T H z から 1 9 0 T H z の波長分割多重信号光をガードバンド内に 4 光波混合による波長変換を行い、等周波数間隔 2 0 0 G H z、チャンネル数 8 の、周波数帯域 1 9 2 T H z から 1 9 3 . 4 T H z の波長分割多重信号光とし、ガードバンド外に励起光周波数 1 8 7 T H z を中心として周波数帯域 1 8 5 . 6 T H z から 1 8 8 . 4 T H z まで広がる雑音周波数と励起光周波数

195 THz を中心として周波数帯域 193.6 THz から 196.4 THz ま  
で広がる雑音周波数配置し、4 光波混合波長変換前の波長分割多重信号光が 4 光  
波混合作用を生じる波長変換媒質通過後の位置に配置されたバンドパス光フィル  
タ 5 で 4 光波混合による波長変換後の周波数帯域 192 THz から 193.4 T  
Hz の波長分割多重信号光を抽出し、雑音をカットする波長変換器 3 を、並列に  
接続して合波器 6 で合波すれば、雑音の伴わない 4 光波混合による波長変換後の  
周波数帯域 192 THz から 195 THz の等周波数間隔 200 GHz、チャン  
ネル数 16 の波長分割多重信号光を得る事ができ、有効な光周波数帯域が活用可  
能な波長変換器ができる。

#### 【0122】

C 帯内の 4 光波混合による波長変換として、2 つの異なる周波数を持つ励起光の  
平均周波数から始まり、4 光波混合による波長変換前の波長分割多重信号光の周  
波数帯域幅以上に設定された帯域幅のガードバンド外に、該波長分割多重信号光  
の波長変換を行い、ガードバンド内に雑音周波数を配置し、4 光波混合後の波長  
分割多重信号光を透過させるバンドパス光フィルタで 4 光波混合後の波長分割多  
重信号光を抽出し、ガードバンド内の雑音周波数をカットすれば、簡単な C 帯内  
の 4 光波混合による波長変換器が出来る。

#### 【0123】

同じ波長帯域内で 4 光波混合による波長変換が実現できる例として、C 帯内の 4  
光波混合による波長変換を実施例 5 として説明する。等周波数間隔 200 GHz  
、チャンネル数 6 の周波数帯域 192 THz から 193 THz の波長分割多重信  
号光に対しては、二つの励起光周波数の平均が、193 THz に起つように決め  
る。例えば一の励起光周波数は 190 THz 以下、もう一つの励起光周波数は 1  
96 THz 以上にする。本実施例では一の励起光周波数は 190 THz、もう一  
つの励起光周波数は 196 THz とする。ガードバンドを 1 THz に設定し、周  
波数帯域 192 THz から 193 THz の波長分割多重信号光をガードバンド外  
に 4 光波混合による波長変換を行い、等周波数間隔 200 GHz、チャンネル数  
6 の周波数帯域 193 THz から 194 THz の波長分割多重信号光とし、ガー  
ドバンド内に励起光周波数 190 THz を中心として周波数帯域 189 THz か

ら 1 9 1 T H z まで広がる雑音周波数と励起光周波数 1 9 6 T H z を中心として周波数帯域 1 9 5 T H z から 1 9 7 T H z まで広がる雑音周波数を配置し、4 光波混合波長変換前の波長分割多重信号光が 4 光波混合作用を生じる波長変換媒質通過後の位置に配置されたバンドパス光フィルタで、4 光波混合による波長変換後の波長帯域 1 9 3 T H z から 1 9 4 T H z の波長分割多重信号光を抽出し、雑音をカットする。

#### 【 0 1 2 4 】

C 帯内の 4 光波混合による波長変換の更なる実施例 6 として前記実施例の逆、等周波数間隔 2 0 0 G H z 、チャンネル数 6 の周波数帯域 1 9 3 T H z から 1 9 4 T H z の波長分割多重信号光を等周波数間隔 2 0 0 G H z 、チャンネル数 6 の周波数帯域 1 9 3 T H z から 1 9 4 T H z の波長分割多重信号光に変換する実施例を示す。等周波数間隔 2 0 0 G H z 、チャンネル数 6 の周波数帯域 1 9 3 T H z から 1 9 4 T H z の波長分割多重信号光に対しては、二つの励起光周波数の平均が、1 9 3 T H z に起つように決める。例えば一の励起光周波数は 1 9 0 T H z 以下、もう一つの励起光周波数は 1 9 6 T H z 以上にする。本実施例では一の励起光周波数は 1 9 0 T H z 、もう一つの励起光周波数は 1 9 6 T H z とする。ガードバンドを 1 T H z に設定し、周波数帯域 1 9 3 T H z から 1 9 4 T H z のの波長分割多重信号光をガードバンド外に 4 光波混合による波長変換を行い、等周波数間隔 2 0 0 G H z 、チャンネル数 6 の周波数帯域 1 9 2 T H z から 1 9 3 T H z の波長分割多重信号光とし、ガードバンド内に励起光周波数 1 9 0 T H z を中心として周波数帯域 1 8 9 T H z から 1 9 1 T H z まで広がる雑音周波数と励起光周波数 1 9 6 T H z を中心として周波数帯域 1 9 5 T H z から 1 9 7 T H z まで広がる雑音周波数を配置し、4 光波混合波長変換前の波長分割多重信号光が 4 光波混合作用を生じる波長変換媒質通過後の位置に配置されたバンドパス光フィルタで、4 光波混合による波長変換後の波長帯域 1 9 2 T H z から 1 9 3 T H z の波長分割多重信号光を抽出し、雑音をカットする。

#### 【 0 1 2 5 】

実施例 5 及び 6 では、2 つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数が、信号の周波数帯域にかかっているが、励起光周波数としては、その周波数位置に実在し

ていないので、この2つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数を光フィルタによって除去する必要がない。従って同じ波長帯域内で4光波混合による波長変換を行いたい場合には、2つの励起光周波数の平均周波数と2つの異なる励起光周波数のどちらか一方の間に、4光波波長変換前の波長分割多重信号光を配置し、2つの異なる励起光周波数の平均周波数に向って、4光波波長変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域幅以上のガードバンドを配置し、4光波混合による波長変換を行い、ガードバンド外に4光波混合による波長変換後の波長分割多重信号光を配置し、雑音周波数を配置する方法は、2つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数を2つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数に最も近い4光波混合による波長変換前の波長分割多重信号光チャンネル周波数にぎりぎりまで近づける事が出来るから、光周波数帯域の有効利用するには最適である。

【0126】

以上の4光波混合による波長変換は、幹線網からアクセス網、或いはアクセス網から幹線網へと波長分割多重信号光をのせる時に、一旦4光波混合による波長変換した後にエルビウムドープ光ファイバ増幅器で増幅後各網へと振り分けた方が良い。2つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数から始まり、波長分割多重信号光の周波数帯域幅以上に設定された周波数帯域を持つガードバンド内に雑音周波数を配置し、ガードバンド内の雑音周波数を光フィルタでカットする4光波混合による波長変換器は、二つの励起光の周波数を中心として、それぞれ両側に4光波混合による波長変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域幅だけ雑音周波数は広がっている。従って二つの励起光の周波数平均と一つの励起光の周波数間隔を波長変換しようとしている波長分割多重信号の周波数帯域幅よりも2倍以上広く取り、4光波混合による波長変換前の波長分割多重信号光チャンネルの周波数と4光波混合による波長変換後の波長分割多重信号光チャンネルの周波数をバンドパス光フィルタで通過させ、雑音周波数を除去すれば、4光波混合による波長変換前と4光波混合による波長変換後の波長分割多重信号光の周波数が存在し、どちらか一方の波長分割多重信号光をドロップし、他の波長分割多重信号光は元の光伝送路に戻せば、波長選択性分岐ができるし、アレイウエイブガイドに入れてやれば、出力導波路に波長変換前と4光波混合による波長変換後の波長分

割多重信号光のチャンネル毎に出てくる。周波数帯域毎に波長分割多重信号光をエルビウムドープ光ファイバ増幅器で増幅可能となり、木目細かなシステム設計が出来る。

#### 【0 1 2 7】

励起光周波数から始まり、励起光周波数と励起光周波数に最も近い波長分割多重信号光のチャンネルとの周波数間隔が該波長分割多重信号光の周波数帯域幅以上に設定された、周波数帯域をもつガードバンドに対して、波長分割多重信号光をガードバンド外に波長変換を行い、ガードバンド内に雑音周波数を配置し、ガードバンド内の雑音周波数を光フィルタでカットする4光波混合による波長変換器の応用例として、現実のところ通信用信号光源として半導体レーザの出力波長（発振波長）が工業的に利用できないS帯に、L帯に在る波長分割多重信号光を、雑音を伴わずに4光波混合による波長変換する事ができる事を説明する。

#### 【0 1 2 8】

L帯にある波長分割多重信号光をS帯に4光波混合による波長変換を行う実施例7として、励起光周波数を195THzに起て、ガードバンドを4THzとして、L帯に在る等周波数間隔200GHz、チャンネル数21の周波数帯域186THzから190THzの波長分割多重信号光を4光波混合による波長変換を行うと、ガードバンド外に等周波数間隔200GHz、チャンネル数21の周波数帯域200THzから204THzの波長分割多重信号光が生じる。雑音周波数は励起光周波数195THzを中心として、191THzから199THzまで広がる。199THz以下の周波数成分を持つ光を光フィルタでカットすれば、雑音の伴わないS帯に在る波長分割多重信号光が出来る。これを通信用光源として利用すれば良い。

#### 【0 1 2 9】

雑音周波数と波長分割多重信号光が分離された4光波混合による波長変換には、既に説明したように所望の周波数を持つ励起光源が必要である事は述べた。この励起光源の周波数については、周波数グリッド上で所望の周波数配置が必要である事を述べる。チャンネルの周波数間隔が等しい波長分割多重信号光は一般にITJからITJグリッドと波長分割多重信号光の基準となる波長又は周波数が

推薦されている。例えばL帯,C帯でチャンネル間隔は周波数で100GHz、波長で0.8nmがITU推薦の周波数グリッドである。又波長分割多重信号光の基準となる波長又は周波数に関してはITU G692 APPENDIXに紹介されている。従ってチャンネルの周波数間隔が等しい波長分割多重信号光は既にITU推薦の基準波長(基準周波数)及びITUグリッドの規格を満足しているから、L帯にあるチャンネルの周波数間隔が等しい波長分割多重信号光をC帯に、或いは、C帯にあるチャンネルの周波数間隔が等しい波長分割多重信号光をL帯に、C帯又はL帯内で、4光波混合による波長変換を行っても、4光波混合による波長変換後もITU推薦の基準波長(基準周波数)及びITUグリッドの規格を満足しなければならない。以下4光波混合による波長変換前の波長分割多重信号光はITU推薦の基準波長(基準周波数)及びITUグリッドの規格を満足するものとする。4光波混合による波長変換は、波長分割多重信号光チャンネルを励起光周波数(或いは2つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数)を中心とする周波数軸上で対称な位置に配置し、又雑音周波数も励起光周波数を中心とする両側に周波数軸上で対称な位置に配置されるから、励起光周波数がグリッド上にある場合は、チャンネルの周波数間隔が等しい波長分割多重信号光を4光波混合による波長変換した後の波長分割多重信号光も、雑音周波数も、ITU推薦の基準波長(基準周波数)及びITUグリッドの規格を満足する事になり、クロストークが大きくなる。

#### 【0130】

一方励起光周波数(或いは2つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数)がグリッド上から僅かずれた場合、チャンネルの周波数間隔が等しい波長分割多重信号光を4光波混合による波長変換した後の波長分割多重信号光が、ITU推薦の基準波長(基準周波数)を満足しない。

#### 【0131】

次に励起光周波数(或いは2つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数)がグリッドの中央にある場合、チャンネルの周波数間隔が等しい波長分割多重信号光を4光波混合による波長変換した後の波長分割多重信号光は、ITU推薦の基準波長(基準周波数)及びITUグリッドの規格を満足し、雑音周波数はITU推薦



の基準波長(基準周波数)から目盛られたITUグリッド上にのらない。従ってクロストークは励起周波数がITUグリッド上にあった場合よりも小さくなる。ガードバンドを設ける本発明に対しては、ガードバンドが波長分割多重信号光の帯域幅と同等か、少し狭い場合でも、4光波混合による波長変換した後の波長分割多重信号光のチャンネルと雑音周波数の重なり具合は狭く、励起光周波数(或いは2つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数)をグリッドの中央に置く本発明は、クロストークに対して有効である。

#### 【0132】

実施例1、実施例2で示したように、どのチャンネルも、ほぼ等しい強度をもつ波長分割多重信号の4光波混合による波長変換は、4光波混合による波長変換後も、波長分割多重信号の強度は、ほぼどのチャンネルも等しい事を示しているが、一般に波長分割多重信号の各チャンネル強度を同じくして、4光波混合による波長変換を行うと、4光波現象の大きさは、波長によって異なる為、チャンネル毎に異なる波長が割り与えられている波長分割多重信号は、4光波混合による波長変換後、波長分割多重信号の各チャンネル強度は、同じにはならないのが通常である。

#### 【0133】

この為に、通常は4光波混合による波長変換後、波長分割多重信号の各チャンネル強度を同じにして、波長分割多重信号の占有周波数帯域幅に亘って、各チャンネル強度のレベルを揃える必要がある。しかし、周波数対4光波混合による波長変換後の波長分割多重信号の強度特性は、システムに応じて要求される仕様によって決まるものであって、一概に波長分割多重信号の各チャンネル強度のレベルを揃える事だけでは収まらない。

#### 【0134】

システムに応じてどのような仕様が有るか、例えば2例を挙げて説明する。4光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光を受信する場合、受信器で良好なS/Nを得るためには、十分な強度を有する信号光が必要である。そのため、EDF増幅器(エルビウムドープファイバ増幅器)をプリアンプとして用いる。この手法では、デテクターの保護と、S/Nを良くする為に、各チャネ

ル強度のレベルを揃える必要がある。この為に E D F 増幅器の利得の周波数特性特性を補正するように、4 光波混合による波長変換後における波長分割多重信号強度の周波数特性を、構成する仕様が在る。

## 【 0 1 3 5 】

もう 1 つの例として、波長分割多重信号が伝送される光ファイバの減衰量は、周波数特性を持っている。これらの減衰量から生じる光伝送システムの伝送損失の周波数特性をシステムの使用する周波数帯域に亘って補償する事が出来れば、極めて、良好な S / N 比を持つ光伝送システムができる。この為に光伝送システムの使用する周波数帯域に亘って伝送損失の周波数特性を補正するように、4 光波混合による波長変換後における波長分割多重信号強度の周波数特性を、構成する仕様が在る。その他必要に応じて 4 光波混合による波長変換後における波長分割多重信号強度の周波数特性を、必要な周波数帯域に亘って例えば波長分割多重信号光を、伝送する時に、信号間のラーマン相互作用によって生じる信号レベルの傾斜を打ち消すように、チルト（傾き）させたりする仕様が在るが、光伝送システムの仕様に応じて決まるものである。本発明は、ここに列挙された仕様に限定されたもの以外にも適用される事は言うまでもない。従って光伝送システムに応じて、四光波混合による波長変換後の強度を所望の周波数特性を持たせる事が重要である。

## 【 0 1 3 6 】

四光波混合による波長変換前、後の波長分割多重信号を所望の周波数特性を有する波長分割多重信号光強度にする必要な技術について述べる。

光周波数帯域に対して、ある指定された減衰量特性を持つ光フィルタの設計方法について簡単に述べる。詳しくは特願 2 0 0 0 - 0 1 5 4 8 4 号を参照。光フィルタは一般に光部品複数個をカスケードに繋ぎ、その入力と出力の透過損失を、必要とする光周波数帯域に対して、ある指定された減衰量特性に合致させるものである。

## 【 0 1 3 7 】

光部品は、エタロン、マッハツエンダ型干渉光学部品等が使用される。これらの部品の出力は、一般に周波数特性を持つ。例えば、光フィルタをエタロンで作

、エタロンの透過損失を最も光フィルタが設計し易いように表わしたパラメータで説明すれば、反射率、厚さ、屈折率、光の入射角である。エタロンの透過損失は、これらのパラメータが非線型結合して、表現されている。従って、光フィルタは、複数個のエタロンが、カスケードに繋がったものであるから、光フィルタを構成している各エタロンの透過損失を表わしている、非線型結合しているパラメータからなる透過損失の対数表現からなる、各エタロンの透過損失の和が、光フィルタの透過損失表現である。必要とする光周波数帯域に対して、周波数毎のある指定された所望の減衰量特性に、このフィルタの周波数透過損失を合せたものである。必要とする光周波数帯域内の異なる周波数 $\lambda_1 \cdots \lambda_N$ を $N$ 個選び、光フィルタの透過損失を表わしたパラメータを、 $a_1, \dots, a_m$ とし、周波数 $\lambda_i$ における、周波数毎のある指定された減衰量 $y_i$ とし、 $y(\lambda_i; a_1, \dots, a_m)$ を、光フィルタの透過損失を表わすものとする。必要とする光周波数帯域内の $N$ 個の周波数 $\lambda_1 \cdots \lambda_N$ における各周波数 $\lambda_i$ での、 $y_i$ と $y(\lambda_i; a_1, \dots, a_m)$ との差の二乗誤差に関して、 $N$ 個の和が最小に成るように、非線形フィッティングの手法を用いて、光フィルタを構成する複数個のエタロンのパラメータを決定する。このようにして任意の減衰量に関して周波数特性を持つ光フィルタを構成できる。例えばEDFの利得の周波数特性を平坦にするように、減衰量を調整した光フィルタが、光等化器である。

#### 【0138】

四光波混合による波長変換後の所望の周波数特性を持つ波長分割多重信号光が必要ならば、波長変換後における波長分割多重信号の強度の周波数特性が、所望の周波数特性に成るように、光フィルタにおける減衰量の周波数特性を、調整してやれば良い。しかし、これらの技術を用いると、四光波混合による波長変換直後の波長分割多重信号の強度は、光フィルタの減衰量分だけ、小さくなる。従って利得等化器を使ったEDF増幅器や利得平坦化したラマン増幅器で四光波混合による波長変換直後の波長分割多重信号の強度を増幅しても良い。

#### 【0139】

四光波混合による波長変換後の所望の周波数特性を持つ波長分割多重信号光に、光フィルタを用いて、実現する方法は、光フィルタの減衰量の周波数特性を利用

しているので、四光波混合による波長変換直後の波長分割多重信号光に損失がある。

【0 1 4 0】

四光波混合による波長変換直後の波長分割多重信号光に損失がなく、所望の周波数特性を有する波長分割多重信号光強度にする技術として、ラーマン増幅器がある。この技術は四光波混合による波長変換直後の波長分割多重信号光だけではなく、四光波混合による波長変換前の波長分割多重信号光強度を所望の周波数特性を有する波長分割多重信号光強度にする事にも適用できる。

【0 1 4 1】

ラーマン増幅器に関する技術を簡単に説明する。複数の異なる励起周波数を用いた多周波励起光源によるラーマン増幅器の利得に関する周波数特性は、各異なる励起周波数をを持つ励起光源から発生する利得の周波数特性を重ねあわせる事によって形成される。しかし、多周波励起光源によるラーマン増幅器は、複数の異なる励起周波数を用いているから、複数の異なる励起周波数を用いた励起光間で、周波数の高い励起光のエネルギーの一部が、周波数の低い励起光のエネルギーに移行する励起光間のラーマン効果がある。

【0 1 4 2】

従って、多周波励起光源によるラーマン増幅器の利得に関する周波数特性は、必要とする利得の周波数特性を得る為に、多周波励起光源を、個々の単一の励起周波数にばらし、その各々の励起光の強度と周波数によるラーマン利得を生成し、それらを合成しても、励起光間のラーマン効果の為に、必要なラーマン増幅器の利得に関する周波数特性が得られない。

【0 1 4 3】

例えば、多周波励起光源によるラーマン増幅器の利得に関する必要とする利得の周波数特性が、平坦であるとする、多周波励起光源を、個々の単一の励起周波数にばらし、その各々の励起光の強度と周波数による、必要とするラーマン利得を生成し、それらを合成しても、低周波側のラーマン増幅器の利得が大きくなる。

【0 1 4 4】

又、ラーマン増幅器は、増幅媒体における励起光と信号光の相互作用長が長い為に、単に励起光入力側の大きさだけで、ラーマン利得は決定されるものではなく、増幅用ファイバのラーマン利得係数と増幅用ファイバの長さ $L$ 全体に亘っての励起光源間のラーマン効果を含めた励起光の強度の積に関して、増幅用ファイバの長さ全体に亘っての積分値が利得に関係してくる。

## 【0145】

以上述べた事、即ち、(1) 多周波励起光源によるラーマン増幅器の必要とする利得の周波数特性を得る為に、励起光源間のラーマン効果による、高周波側の励起光のエネルギーが、低周波側に移って、多周波励起光源によるラーマン利得が生じる事、(2) 増幅用ファイバのラーマン利得係数が、増幅用ファイバの長さ全体に亘って一定とすると、周波数の異なる励起光の各々に関して、増幅用ファイバの長さ $L$ 全体に亘っての励起光源間のラーマン効果を含めた励起光の強度に関する積分値と利得係数の積の和が、ラーマン利得の $L$ 倍である。

## 【0146】

しかし、現在のところ(1)、(2)の決定は、試験錯誤的に定量的になされており、必要とするラーマン利得の周波数特性は、光フィルタを設計したように機械的に出来るものではない。現在のところ、ラーマン利得の周波数特性は、平坦、傾き等の周波数特性を持つラーマン利得が得られている。

## 【0147】

ラーマン増幅媒体の周波数に対する利得係数形状は、それ以上変える事が出来なく、多周波光源から成るラーマン利得を、単純にラーマン増幅媒体である光ファイバの利得係数のピークを多周波光源の周波数分だけずらした、それらを重ねあわせた合成と考えると、複雑なラーマン利得の周波数特性を得る事は難しい。

## 【0148】

波長分割多重信号光の所望の周波数特性を得ようとすれば、ラーマン利得の周波数特性を平坦に設定し、波長分割多重信号光の強度が必要な周波数特性を持つように、光フィルタの周波数特性を設定し、ラーマン増幅器と光フィルタに、波長分割多重信号光を、通過させれば良い。ラーマン増幅器利得は、20 dB程度増幅可能であるから、光フィルタを通過するに当たっての挿入損失を補償する事が

出来る。

【0149】

以上のところは、波長分割多重信号光の強度が必要な周波数特性を持つように、光フィルタの減衰量の周波数特性やラーマン増幅器の周波数特性を適度に利用する方法を述べた。

【0150】

波長分割多重信号光の各チャンネルの強度を同じ値にして、四光波混合による波長変換を行っても、波長分割多重信号光の各チャンネルに割り当てられている周波数が異なる為、四光波混合現象の大きさの周波数依存性により、四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光の各チャンネル強度は、一様とはならず、周波数得性を持つ。

【0151】

四光波混合による波長変換前における波長分割多重信号光の各チャンネル強度の大きさを変える事によって、四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光の強度の周波数得性を、平坦にする事について説明する。

【0152】

数式5により、四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光の各チャンネル強度のそれぞれは、それぞれに対応する四光波混合による波長変換前における波長分割多重信号光における各チャンネルのそれぞれの強度と励起光強度の2乗との積に比例する。従って四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光の各チャンネル強度に対応する、四光波混合による波長変換前における波長分割多重信号光におけるチャンネルの強度を変化させると、対応の素に成った四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光のチャンネル強度は、線形に変化する。

【0153】

つまり、四光波混合による波長変換前における波長分割多重信号光における各チャンネルと四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光における各チャンネルは、1対1対応をする。互いに対応した四光波混合による波長変換前における波長分割多重信号光におけるチャンネルと四光波混合による波長変換後

における波長分割多重信号光におけるチャンネルにおいて、四光波混合による波長変換前における波長分割多重信号光におけるチャンネルの強度を変化させると、この変化に応じて、線形的に、四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光におけるチャンネル強度は変化する。

## 【0154】

四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光における、複数のチャンネルについて、周波数 $\omega_{csi}$ の各チャンネル強度が $S_{ci}(\omega_{csi})$  dBの周波数特性を持っているとしたら、それらの各チャンネル強度の周波数特性が平坦になるように、四光波混合による波長変換前における波長分割多重信号光における周波数 $\omega_{si}$ の各チャンネル強度 $S_i(\omega_{si})$  dBを変化させて、調整すれば良い。

## 【0155】

具体的には、四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光における、各チャンネル強度の平坦性が要求される周波数 $\omega_{csi}$ に亘って、波長分割多重信号光の強度が $K_1$  dBであるとする、 $\Delta = K_1 - S_{ci}(\omega_{csi})$ だけ、 $\omega_{csi}$ に対応する四光波混合による波長変換前における波長分割多重信号光における周波数 $\omega_{si}$ のチャンネル強度を変化させれば良い。 $\omega_{csi}$ に対応する $\Delta$ が正の $\omega_{csi}$ に対応する四光波混合による波長変換前における波長分割多重信号光における周波数 $\omega_{si}$ のチャンネル強度を絶対値 $|\Delta|$ だけ大きくする。 $\Delta = 0$ の $\omega_{csi}$ に対応する四光波混合による波長変換前における波長分割多重信号光における周波数 $\omega_{si}$ のチャンネル強度の大きさは変えない。 $\Delta$ が負の $\omega_{csi}$ に対応する四光波混合による波長変換前における波長分割多重信号光における周波数 $\omega_{si}$ のチャンネル強度を絶対値 $|\Delta|$ だけ小さくする。

## 【0156】

上述の具体例1としては、四光波混合による波長変換前における波長分割多重信号光における周波数 $\omega_{si}$ のチャンネル強度の大きさを、変えることは、四光波混合による波長変換前における波長分割多重信号光の各チャンネルの光源、例えば半導体レーザの出力を、駆動電流を調節する事によって成される。

## 【0157】

上述の具体例2としては、 $\omega_{csi}$ に対応する $\Delta$ の周波数に対する形状が、単純な

条件、例えば、185 THz から 194 THz に対応する低周波側から高周波側に向かって正の傾きを要する場合では、四光波混合による波長変換前における波長分割多重信号光における周波数  $\omega_{si}$  のチャンネル強度の大きさを、ラーマン増幅器を用いて、所要の絶対値  $|\Delta|$  だけ増ずるように補償しても良い。

## 【0158】

上述の具体例3としては、四光波混合による波長変換前における波長分割多重信号光における周波数  $\omega_{si}$  のチャンネル強度の大きさを、周波数特性が平坦な利得を持つラーマン増幅器と光フィルタを用いて、所要の絶対値  $|\Delta|$  だけ増減するように補償しても良い。

## 【0159】

具体例1、2、3では四光波混合による波長変換前における波長分割多重信号光における周波数  $\omega_{si}$  のチャンネル強度の大きさを、所要の絶対値  $|\Delta|$  だけ増減するように補償したが、四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光における、各チャンネル強度の平坦性が要求される周波数  $\omega_{csi}$  に亘って、四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光強度の大きさが、 $K_2$  に成るように決定しても良い。

## 【0160】

具体的には、四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光における、各チャンネル強度の平坦性が要求される周波数  $\omega_{csi}$  に亘る、複数のチャンネルについて、周波数  $\omega_{csi}$  の各チャンネル強度  $S_{ci}(\omega_{csi})$  dB が周波数特性を持っているとする。四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光における、平坦性が要求される各チャンネル強度は  $K_2$  dB であるとする。

## 【0161】

四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光における、平坦性が要求される周波数  $\omega_{csi}$  に亘る、周波数  $\omega_{csi}$  の各チャンネル強度を  $K_2$  dB にする為に、増幅器または光フィルタを用いる。その為に必要とする増幅器の利得の周波数特性や光フィルタの減衰量の周波数特性について述べる。

## 【0162】

周波数  $\omega_{csi}$  における増幅器利得の周波数特性または光フィルタ減衰量の周波数



特性を  $S(\omega_{csi})$  とすると、 $S(\omega_{csi}) = K_2 - S_{ci}(\omega_{csi})$  を満足しなければ成らない。上式の物理的意味は、平坦性が要求される周波数  $\omega_{csi}$  に亘る、周波数  $\omega_{csi}$  の各チャンネル強度を  $K_2$  dB にする為には、光増幅で増幅するか、光フィルタで減衰するか、或いは、その両方で、適度に増減して、一定値  $K_2$  にするという事を意味している。 $S_{ci}(\omega_{csi})$  の最大値を  $S_{max}$ 、最小値を  $S_{min}$  とする。

## 【0163】

(1) 平坦性が要求される全ての周波数  $\omega_{csi}$  に対して、 $K_2 \geq S_{max}$  であるならば、 $S(\omega_{csi})$  を実現するには、増幅器、増幅器および光フィルタを用いて実現できる。

(2) 平坦性が要求される全ての周波数  $\omega_{csi}$  に対して、 $K_2 \leq S_{min}$  であるならば、 $S(\omega_{csi})$  を実現するには、光フィルタを用いて実現できる。

## 【0164】

具体的に(1)の例を示す。四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光における、平坦性が要求される周波数  $\omega_{csi}$  が低周波例えば 164 THz から高周波 194 THz に亘る場合、周波数  $\omega_{csi}$  の各チャンネル強度が、低周波側から高周波側に向かって負の傾き  $-m$  を持っているとする。ラーマン増幅器の利得周波数特性は、低周波側 164 THz から高周波側 194 THz にかけて、正の傾き  $m$  を持つ利得を持たせる事が出来るから、四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光の 164 THz から 194 THz にかけてのチャンネルの傾きを、平坦に出来る。ラーマン増幅器の 164 THz から 194 THz にかけての傾きを保ったまま、164 THz において、チャンネルの強度が  $K_2$  に成るようにラーマン増幅器の利得を調整したラーマン増幅器に通す事によって、四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光の 164 THz から 194 THz にかけてのチャンネルの平坦性と所要の強度の大きさを実現できる。更にもう1つの例として、増幅器及び光フィルタを用いて、平坦性が要求される全ての周波数  $\omega_{csi}$  に対して、所要の強度の大きさを実現できる事を示す。

## 【0165】

0. 1 dB 程度の偏差を許せば、平坦な利得周波数特を持つラーマン増幅器をつ

くる事が出来る。平坦なラーマン増幅器の利得を $M$ とし、 $M \geq (K_2 - S_{ci}(\omega_{csi}))_{\max}$ とする。全ての周波数 $\omega_{csi}$ に対して、 $K_2 - S_{ci}(\omega_{csi})$  成る利得を持つ、光フィルタ付き、ラーマン増幅器を作る。その為には、 $M - (K_2 - S_{ci}(\omega_{csi}))$  成る周波数特性を持った光フィルタを作る必要がある。光を、利得 $M$ のラーマン増幅器に、光フィルタの減衰量特性 $M - (K_2 - S_{ci}(\omega_{csi}))$  を通せば、光フィルタ付き、ラーマン増幅器の利得特性 $K_2 - S_{ci}(\omega_{csi})$  が得られる。周波数 $\omega_{csi}$ の各チャンネル強度が $S_{ci}(\omega_{csi})$ であるから、加えてやると全ての周波数 $\omega_{csi}$ に対して一定の量 $K_2$ が得られる。

【0166】

具体的に(2)の例を示す。光フィルタの周波数特性 $S(\omega_{csi}) = K_2 - S_{ci}(\omega_{csi})$ であるから、周波数特性が要求される光フィルタの減衰量の大きさは、定数部分 $K_2$ を除いては、四光波混合による波長変換後における波長分割多重信号光における、平坦性が要求される周波数 $\omega_{csi}$ に亘る各チャンネル強度の周波数特性と同じ大きさである。従って光フィルタの減衰量の大きさは、平坦性が要求される各周波数 $\omega_{csi}$ において各チャンネル強度 $S_{ci}(\omega_{csi})$  dBから $K_2$  dB差し引いた値である。つまり、平坦性が要求される各周波数 $\omega_{csi}$ において各チャンネル強度 $S_{ci}(\omega_{csi})$  dBよりも $K_2$  dBだけ小さくした大きさが、光フィルタの減衰量の大きさである。かくして、平坦性が要求される全ての周波数 $\omega_{csi}$ に対して、一定の $K_2$ 強度の大きさを実現できる。

【0167】

尚、各周波数 $\omega_{csi}$ において、各チャンネル強度 $S_{ci}(\omega_{csi})$ が所望の周波数特性 $H(\omega_{csi})$ が要求される場合、周波数 $\omega_{csi}$ における増幅器利得の周波数特性、光フィルタ減衰量の周波数特性、又は増幅器と光フィルタを組み合わせた周波数特性を $S(\omega_{csi})$ とすると、 $H(\omega_{csi}) = S(\omega_{csi}) + S_{ci}(\omega_{csi})$ を満足させれば良い。光を、利得周波数特性が均一で、利得 $M$ のラーマン増幅器に、光フィルタの減衰量特性 $M - (H(\omega_{csi}) - S_{ci}(\omega_{csi}))$ を通せば、光フィルタ付き、ラーマン増幅器の利得特性 $H(\omega_{csi}) - S_{ci}(\omega_{csi})$ が得られる。周波数 $\omega_{csi}$ の各チャンネル強度が $S_{ci}(\omega_{csi})$ であるから、加えてやると全ての周波数 $\omega_{csi}$ に対して $H(\omega_{csi})$ が得られる。光フィルタの減衰量特性 $M -$

$H(\omega_{csi}) - S_{ci}(\omega_{csi})$  は、数値的に与えられるから、光フィルタは、既に、説明した事から、設計できる。従って周波数特性が平坦のラーマン増幅器の利得  $M$  が、 $(H(\omega_{csi}) - S_{ci}(\omega_{csi}))_{\max}$  よりも、大きければ、所望の周波数  $\omega_{csi}$  において、各チャンネル強度  $S_{ci}(\omega_{csi})$  が所望の周波数特性  $H(\omega_{csi})$  になるように、光フィルタの減衰量特性を設計できる。

【0168】

図9は、波長分割多重信号を、信号光用増幅器10、例えばEDF増幅器、ラーマン増幅器に通し、増幅する。四光波混合による波長変換用、励器用レーザ7、例えば半導体レーザを、励器用増幅器9、例えば、EDF増幅器で増幅した励起光と、前記信号用増幅器を通過した波長分割多重信号を、合波し、四光波混合による波長変換媒体、例えば高非線型DSFに、入れると、四光波混合による波長変換が生じる。この時、高次4光波混合による波長変換が生じ、雑音となる周波数を持った成分が発生する。的確な  $S/N$  を持つように、励器用増幅器の利得を大きくし、励起光の大きさを大きくしたり、四光波混合による波長変換される前の信号光のチャンネル強度を変えたりして、四光波混合による波長変換された信号光と、この雑音となる成分の比を調整する。

【0169】

図10は、ガードバンド外に四光波混合による波長変換された信号光を配置し、ガードバンド内に雑音を配置する1励起光波長変換方法による波長変換器2と、この雑音を除去するフィルタ4から成る光部品Aと、二つの励起光の周波数平均に向けて、励起光周波数から波長変換したい信号光の周波数帯域幅以上のガードバンドとの間に四光波混合による波長変換された信号光を配置し、ガードバンド内に雑音を配置する、2励起光波長変換方法による波長変換器3と、この雑音を除去するバンドパスフィルタ5から成る光部品Bと、を並列に接続し、その入力側を分波器1に接続し、その出力側を合波器6に接続する。光部品Aの出力側では、ガードバンド内の光周波数帯域が、雑音も無く、空いている。合波器6を経た後には、その光周波数帯域には、光部品Bにおける二つの励起光の周波数平均に向けて、励起光周波数から波長変換したい信号光の周波数帯域幅以上の帯域からなるガードバンドとの間に4光波混合による波長変換後の信号光が、入って、

光周波数帯域を、有効に利用している。

【 0 1 7 0 】

雑音と波長変換後の信号光を分離するには、励起光の周波数と波長分割多重信号の内、最も励起光の周波数に近いチャンネルの周波数との間隔を、波長分割多重信号の占有周波数帯域幅以上広く取らなければならない。又 2 本周波数の異なる励起光を起てる場合も、この 2 本の励起光周波数の平均周波数と異なる励起光周波数の間隔を、波長分割多重信号の占有周波数帯域幅の 2 倍以上取らなければならない。又波長分割多重信号の占有周波数帯域が広い場合は、4 光波混合効率が悪くなる。

【 0 1 7 1 】

この様な 4 光波混合による波長変換を使用した、有効な光周波数帯域を使う波長変換器は、波長分割多重信号の占有周波数帯域が広い場合は、適度に分割して、占有周波数帯域の広い波長分割多重信号を、より狭い占有周波数帯域幅を持つ、複数の波長分割多重信号に分割しなければ成らない。

【 0 1 7 2 】

4 光波混合効率を考慮すると、2 本周波数の異なる励起光を起てる 4 光波混合による波長変換方法は、この 2 本の励起光の周波数平均に向けて励起光周波数から波長変換したい信号光の周波数帯域幅以上の帯域からなるガードバンドとの間に、4 光波混合による波長変換後の信号光が起ち、かつ、2 本の励起光の周波数平均には、励起光は実在しないので、フィルタで除去する必要が無い。従って、有効な光周波数帯域を使うには、有用である。

【 0 1 7 3 】

従って、占有周波数帯域の広い波長分割多重信号を、N 分割する。1 励起光波長変換方法による光部品 A の励起光周波数と 2 励起光波長変換方法による光部品 B の 2 つの励起光周波数平均を同じ値にする。N 分割された波長分割多重信号の内、2 本の異なる励起光の周波数の平均に最も近い周波数チャンネルを含む波長分割多重信号を、2 本の励起光の周波数平均に向けて励起光周波数から波長変換したい信号光の周波数帯域幅以上の帯域からなるガードバンドとの間に、4 光波混合による波長変換後の信号光を起てる方法である 2 励起光波長変換方法を使った光

部品Bで波長変換する。当然の事であるが、最も近い周波数チャンネルを含む波長分割多重信号の占有周波数帯域幅の2倍以上に、励起光周波数と2つの励起光周波数平均の周波数間隔はあるものとする。ガードバンド外に4光波混合による波長変換後の信号光を起てる方法を使った $N-1$ 個の光部品Aを並列に接続し、それぞれの $N-1$ 個の光部品に、他の $N-1$ 個の波長分割多重信号をそれぞれ割り当てて、波長変換する。当然の事であるが、 $N-1$ 個のそれぞれの波長分割多重信号占有周波数帯域幅よりも、これらの励起光周波数と、2本の励起光周波数の平均が同じなので、4光波混合による波長変換後の信号光の周波数配置は跳びが無い。これらの波長変換後の波長分割多重信号光を合波すれば、有効な光周波数帯域を使う事が出来る事は、言うまでも無い。光部品Bとそれぞれの $N-1$ 個の光部品Aは、互いに、並列に接続する。分波器の説明を簡単にする。

## 【0174】

光部品A、光部品Bに入ってくる波長分割多重信号光は割与えられた周波数を持つので、幹線光ファイバ伝送路における、波長分割多重信号光を、光部品A、光部品Bに割り当てられ周波数成分を持つように、分波器で、分波しなければ成らない。その為には、例えば、アレー導波路形合分波器を用いる。アレー導波路形合分波器の入力の一本を、幹線光ファイバ伝送路に接続する。このアレー導波路形合分波器の出力側では、それぞれの周波数に応じて、各出力導波路に出射する。この出射した周波数に応じた各導波路を、光部品A、光部品Bに割り当てられ周波数成分を持つように、まとめて合波すると、光部品A、光部品Bに割り当てられ周波数成分を持つような $N$ 個の分岐を持つような分波器が出来る。合波器については、光部品A、光部品Bの出力側の $N$ 端子を、 $N$ 対1の分岐器で接続すれば良い。

## 【0175】

占有周波数帯域の広い波長分割多重信号を、 $N$ 分割し、ガードバンド外に4光波混合による波長変換後の信号光を起てる励起光の周波数と、ガードバンド内に4光波混合による波長変換後の信号光を起てる、2本の異なる励起光の周波数の平均を同じ値にする。 $N$ 分割された波長分割多重信号の内、2本の異なる励起光の周波数の平均に最も近い周波数チャンネルを含む波長分割多重信号をガードバン

ド内に、4 光波混合による波長変換後の信号光を起てる方法を使った光部品 B で波長変換する。当然の事であるが、最も近い周波数チャンネルを含む波長分割多重信号の占有周波数帯域幅の 2 倍以上に、励起光周波数と 2 つの励起光周波数平均の周波数間隔はあるものとする。ガードバンド外に 4 光波混合による波長変換後の信号光を起てる方法を使った  $N - 1$  個の光部品 A を並列に接続し、それぞれの  $N - 1$  個の光部品に、他の  $N - 1$  個の波長分割多重信号をそれぞれ割り当てて、波長変換する。当然の事であるが、 $N - 1$  個のそれぞれの波長分割多重信号占有周波数帯域幅よりも、これらの励起光周波数と、2 本の励起光周波数の平均が同じなので、4 光波混合による波長変換後の信号光の周波数配置は跳びが無い。これらの波長変換後の波長分割多重信号光を合波すれば、有効な光周波数帯域を使う事が出来る事は、言うまでも無い。光部品 B とそれぞれの  $N - 1$  個の光部品 A は、互いに、並列に接続する。分波器の説明を簡単にする。

## 【0 1 7 6】

光部品 A、光部品 B に入ってくる波長分割多重信号光は割与えられた周波数を持つので、幹線光ファイバ伝送路における、波長分割多重信号光を、光部品 A、光部品 B に割り当てられ周波数成分を持つように、分波器で、分波しなければ成らない。その為には、例えば、アレー導波路形合分波器を用いる。アレー導波路形合分波器の入力の一本を、幹線光ファイバ伝送路に接続する。このアレー導波路形合分波器の出力側では、それぞれの周波数に応じて、各出力導波路に出射する。この出射した周波数に応じた各導波路を、光部品 A、光部品 B に割り当てられ周波数成分を持つように、まとめて合波すると、光部品 A、光部品 B に割り当てられ周波数成分を持つような  $N$  個の分岐を持つような分波器が出来る。合波器については、光部品 A、光部品 B の出力側の  $N$  端子を、 $N$  対 1 の分岐器で接続すれば良い。

## 【0 1 7 7】

以上のように、光部品 A、光部品 B を用いて、雑音を伴わない波長変換器を説明したが、 $N$  分割された波長分割多重信号をガードバンドを設定した上述の 1 励起光波長変換器を  $N$  個用いて波長変換を行う。これらの波長変換器を並列につないで、所定の周波数分割幅になるように分配器でこれらの  $N$  個の波長分配器に波長

分割された信号光を分配する。この時の分割幅は、分割される信号光の内、励起光に最近接の信号光と励起光の周波数間隔以下にする。このようにすれば、1 励起波長方法でも、雑音に伴わない有効な周波数帯域を利用する波長変換器が実現できる。

## 【 0 1 7 8 】

図 1 1 (A)、(B) は、高次 4 光波混合により生じる雑音と 4 光波混合による波長変換後の信号光との  $S/N$  を調整したり、この雑音周波数と波長変換後における信号光の周波数分離を行う方法において、更に 4 光波混合による波長変換後の信号光強度の周波数特性を、傾けたり、平坦にしたり、即ちシステムに応じた所望の周波数特性にするために、光フィルタ 1 1、或いは E D F 増幅器、ラマン増幅器を使用して 4 光波混合による波長変換前の信号光強度を、調整するシステム概略図である。

## 【 0 1 7 9 】

図 1 2 (A)、(B) 及び (C) は、高次 4 光波混合により生じる雑音と 4 光波混合による波長変換後の信号光との  $S/N$  を調整したり、この雑音周波数と波長変換後における信号光の周波数分離を行う方法において、更に 4 光波混合による波長変換後の信号光強度の周波数特性を、傾けたり、平坦にしたり、即ちシステムに応じた所望の周波数特性にするために、信号光が波長変換する前、信号光が波長変換した後、のどちらか一方の過程に、光フィルタを入れたシステム外略図である。

## 【 0 1 8 0 】

図 1 3 (A)、(B) 及び (C) は、高次 4 光波混合により生じる雑音と 4 光波混合による波長変換後の信号光との  $S/N$  を調整したり、この雑音周波数と波長変換後における信号光の周波数分離を行う方法において、更に 4 光波混合による波長変換後、信号光強度の落ち込みを小さくする為にするために、信号光が波長変換する前、信号光が波長変換した後、のどちらか一方の過程に、増幅器を入れたシステム外略図である。増幅器 1 2 は、E D F 増幅器、ラマン増幅器である。

## 【 0 1 8 1 】

図 1 4 (A)、(B) 及び (C) は、高次 4 光波混合により生じる雑音と 4 光波混合による波長変換後の信号光との  $S/N$  を調整したり、この雑音周波数と波長変換後における信号光の周波数分離を行う方法において、更に 4 光波混合による波長変換後の信号光強度の周波数特性を、傾けたり、平坦にしたり、即ちシステムに応じた所望の周波数特性にするために、信号光が波長変換する前、信号光が波長変換した後、のどちらか一方の過程に、ラーマン増幅器 1 3 を入れたシステム外略図である。

【0 1 8 2】

【発明の効果】

波長分割多重信号光の周波数帯域幅にガードバンドの周波数帯域幅が設定され、ガードバンド外に 4 光波混合による波長変換の波長分割多重信号光を配置し、ガードバンド内に雑音を配置する方法と、4 光波波長変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域を、2 つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数  $\omega_0$  と、どちらか一方の励起光周波数の間に置いて、平均周波数  $\omega_0$  を中心にして、4 光波混合による波長変換を行い、2 本の励起光の周波数平均に向って、励起光周波数から波長変換したい信号光の周波数帯域幅以上の帯域を有するガードバンドとの間に、4 光波混合による波長変換の波長分割多重信号光を配置し、ガードバンド内に雑音を配置する方法にによって、雑音周波数の存在する周波数位置が明らかになり、雑音を光フィルタでカットすることにより、4 光波混合による波長変換前の波長分割多重信号光及び、又は 4 光波混合による波長変換後の波長分割多重信号光を抽出する事が出来るようになった。前記二つの 4 光波混合による波長変換を組み合わせる事で、光周波数帯域の有効活用が出来るようになった。励起光周波数（或いは 2 つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数）がグリッドの中央に配置する事によって、ガードバンドの周波数帯域幅が波長分割多重信号光に帯域幅よりも、同等か、少しばかり狭い場合であっても、4 光波混合による波長変換の波長分割多重信号光と雑音のクロストークが小さくなった。

【0 1 8 3】

半導体レーザとして工業的に利用できる信号光源のない S 帯に、L 帯の波長分割多重信号光を本発明による 4 光波混合による波長変換を行う事によって、雑音



のない S 帯の波長分割多重信号光を得る事ができ、これを S 帯の信号光源として利用できるようになった。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

原理となる 4 光波混合による波長変換の説明図である。

【図 2】

原理となる縮退 4 光波混合による信号波の波長変換の説明図である。

【図 3】

本発明の原理となる高次 4 光波混合による波長変換によって生じる雑音周波数の説明図である。

【図 4】

波長分割多重信号光の周波数帯域幅よりも広い周波数帯域を持つガードバンドを起てた場合の、波長分割多重信号光と縮退 4 光波混合による信号波の波長変換後の周波数位置と高次 4 光波混合による波長変換によって生じる雑音周波数の位置を示す模式図である。

【図 5】

ガードバンド 3.4 THz に設定して、ガードバンド内に雑音周波数を配置し、ガードバンド外に 4 光波混合による波長変換後の波長分割多重信号光配置した本発明の実施例 1 である。

【図 6】

4 光波波長変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域を周波数  $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{p2}$  において、2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  と励起光周波数  $\omega_{p1}$  の間に置いて、4 光波混合による波長変換を行い、2 つの励起光の平均周波数  $\omega_0$  と励起光周波数  $\omega_{p1}$  との周波数間隔が、波長分割多重信号光の周波数帯域幅よりも広い、4 光波混合による波長変換後の波長分割多重信号光配置した本発明の模式図である。

【図 7】

ガードバンド 1.2 THz に設定して、ガードバンド内に雑音周波数を配置し、2 つの励起光の平均周波数と、励起光周波数を中心とするガードバンドの間に、4 光波混合による波長変換後の波長分割多重信号光配置した本発明の実施例 2 である

## 【図 8】

ガードバンド外に 4 光波混合による波長変換後の波長分割多重信号光を配置し、ガードバンド内に雑音を配置する 1 励起光波長変換方法と、4 光波波長変換前の波長分割多重信号光の周波数帯域を、2 つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数  $\omega_0$  と、どちらか一方の励起光周波数の間に置いて、平均周波数  $\omega_0$  を中心にして、4 光波混合による波長変換を行い、2 本の励起光の周波数平均に向って励起光周波数から波長変換したい信号光の周波数帯域幅以上の帯域を有するガードバンドとの間に、4 光波混合による波長変換の波長分割多重信号光を配置し、ガードバンド内に雑音を配置する 2 励起光波長変換方法方法、とによる波長変換器を 2 つ組み合わせて、雑音のない 4 光波混合による波長変換器を作る模式図である。

## 【図 9】

4 光波混合前の波長分割多重信号の強度を調節する、システム外略図である。

## 【図 10】

1 個の光部品 A と複数個のそれぞれの光部品 B を並列に接続した模式図である。

## 【図 11】

図 11 (A) は、システムに応じた周波数特性にするために、光フィルタを使用して、4 光波混合による波長変換前の信号光強度を調整するシステムの一実施例を示す概略図である。

図 11 (B) は、システムに応じた周波数特性にするために、光フィルタ或いは EDF 増幅器、ラマン増幅器を使用して、4 光波混合による波長変換前の信号光強度を調整するシステムの一実施例を示す概略図である。

## 【図 12】

図 12 (A) は、システムに応じた所望の周波数特性にするために、信号光を波長変換した後、光フィルタを配置させたシステムの一実施例を示す概略図である。

図 12 (B) は、システムに応じた所望の周波数特性にするために、信号光を波長変換する前に、光フィルタを配置させたシステムの一実施例を示す概略図であ

る。

図 1 2 (C) は、システムに応じた所望の周波数特性にするために、信号光を波長変換する前と波長変換した後に、光フィルタを配置させたシステムの一実施例を示す概略図である。

【図 1 3】

図 1 3 (A) は、4 光波混合による波長変換後に増幅器を配置させたシステムの一実施例を示す概略図である。

図 1 3 (B) は、4 光波混合による波長変換前に増幅器を配置させたシステムの一実施例を示す概略図である。

図 1 3 (C) は、4 光波混合による波長変換前と波長変換後に増幅器を配置させたシステムの一実施例を示す概略図である。

【図 1 4】

図 1 4 (A) は、システムに応じた所望の周波数特性にするために、信号光が波長変換した後に、ラーマン増幅器を配置させたシステムの一実施例を示す概略図である。

図 1 4 (B) は、システムに応じた所望の周波数特性にするために、信号光を波長変換する前に、ラーマン増幅器を配置させたシステムの一実施例を示す概略図である。

図 1 4 (C) は、システムに応じた所望の周波数特性にするために、信号光を波長変換する前と波長変換した後に、ラーマン増幅器を配置させたシステムの一実施例を示す概略図である。

【符号の説明】

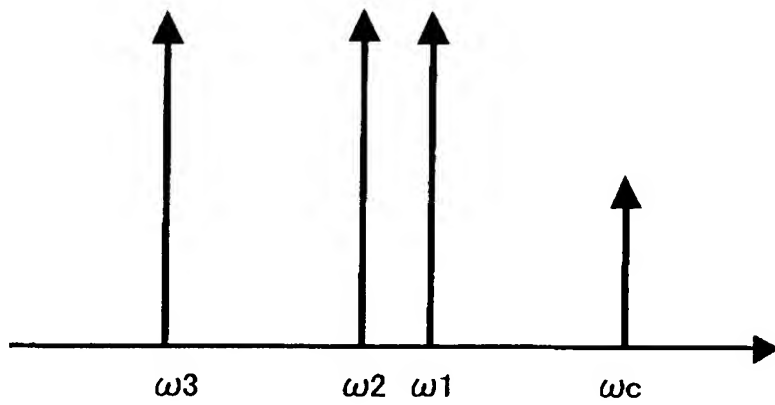
- 1        分波器
- 2        波長変換器
- 3        波長変換器
- 4        光フィルタ
- 5        バンドパス光フィルタ
- 6        合波器
- 7        ラーマン励器用光源

- 8 四光波混合発生媒体
- 9 励起光源用増幅器
- 1 0 信号光増幅用増幅器
- 1 1 光フィルタ
- 1 2 増幅器(ラーマン増幅器, E D F 増幅器)
- 1 3 ラーマン増幅器

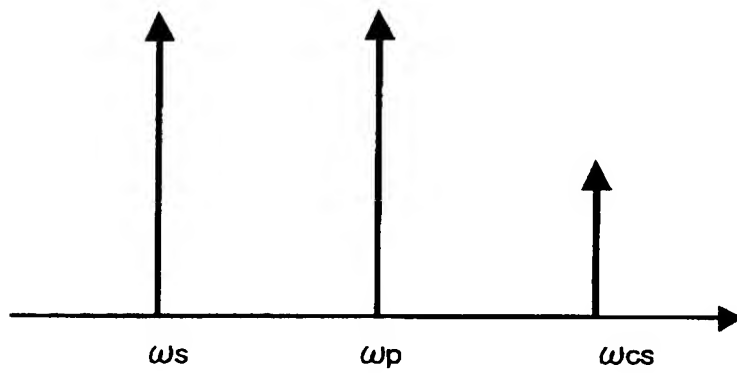
【書類名】

図面

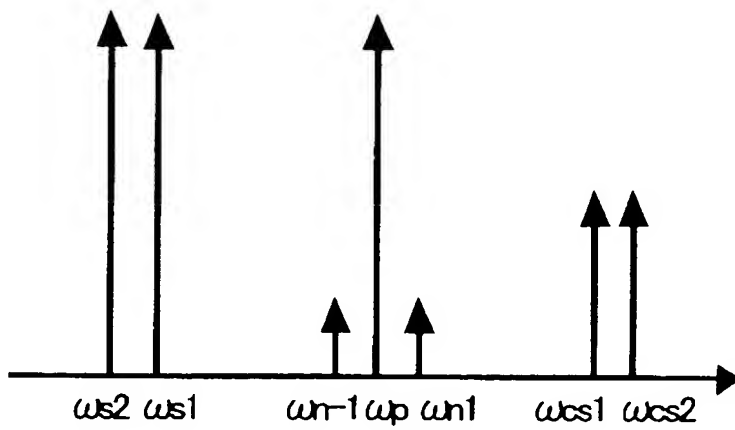
【図 1】



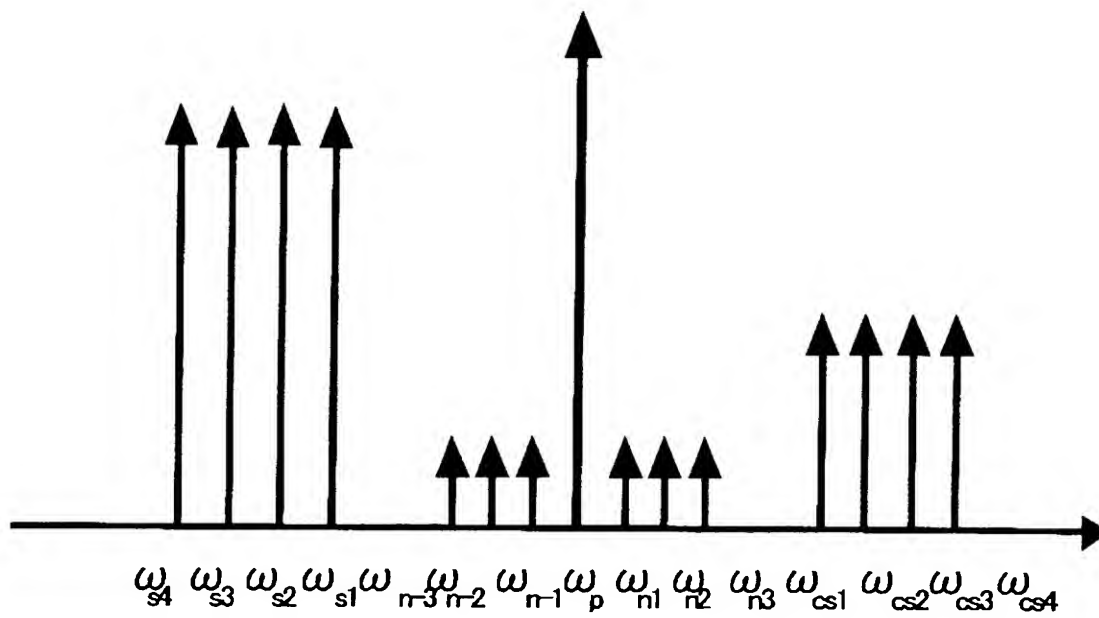
【図 2】



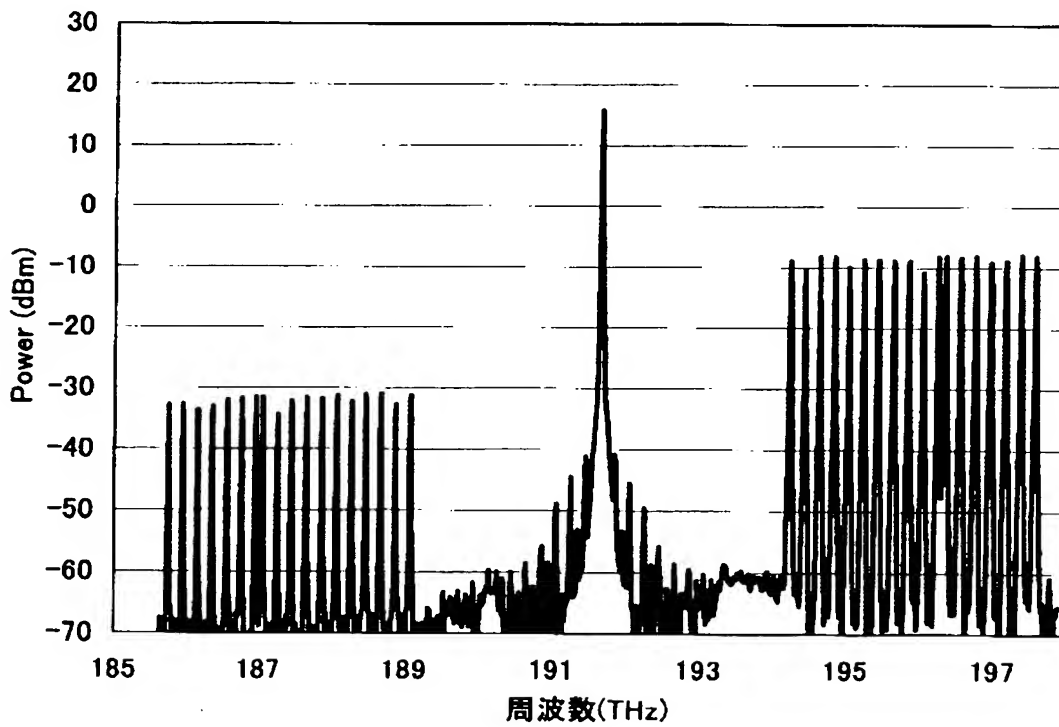
【図 3】



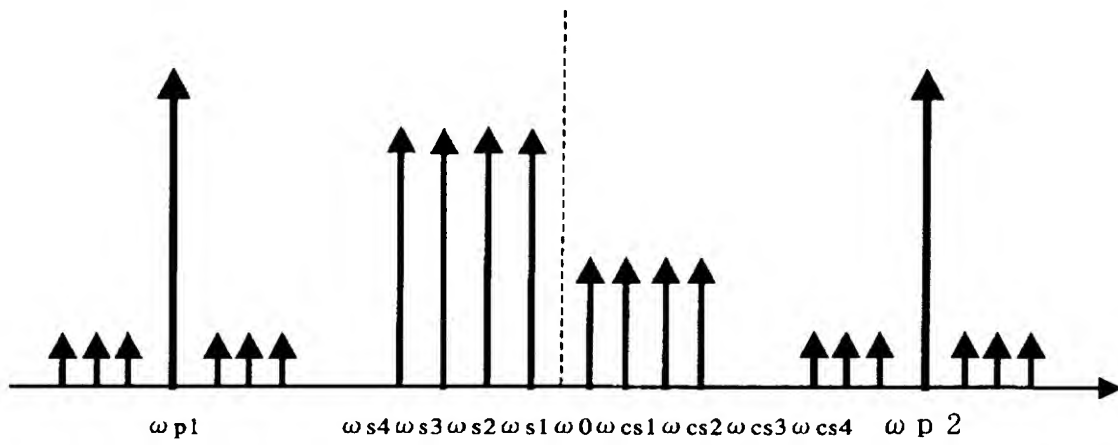
【図 4】



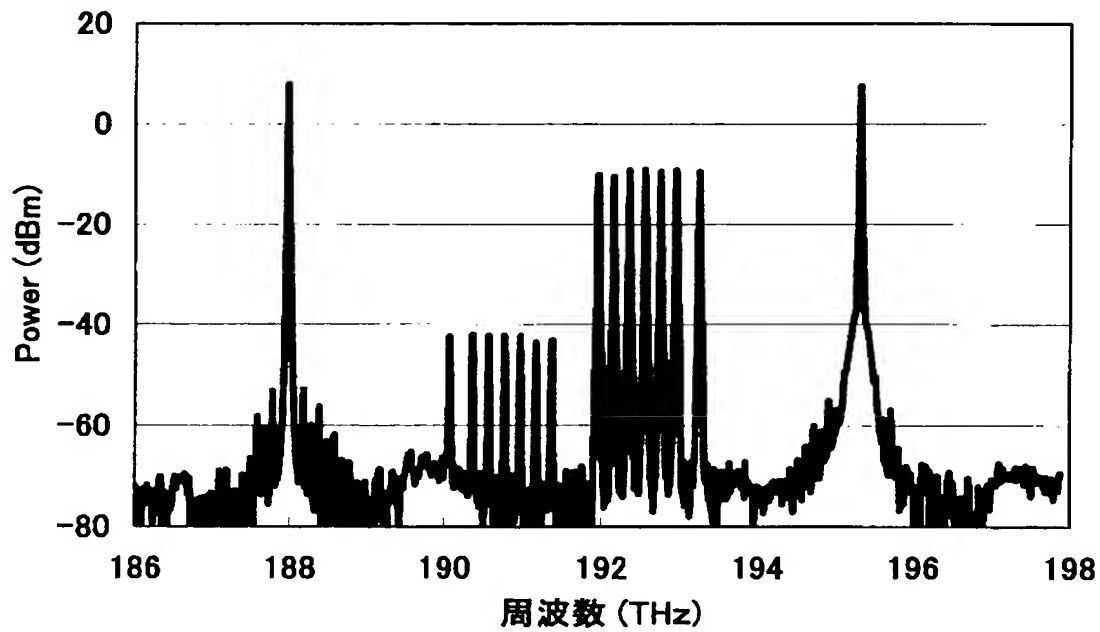
【図 5】



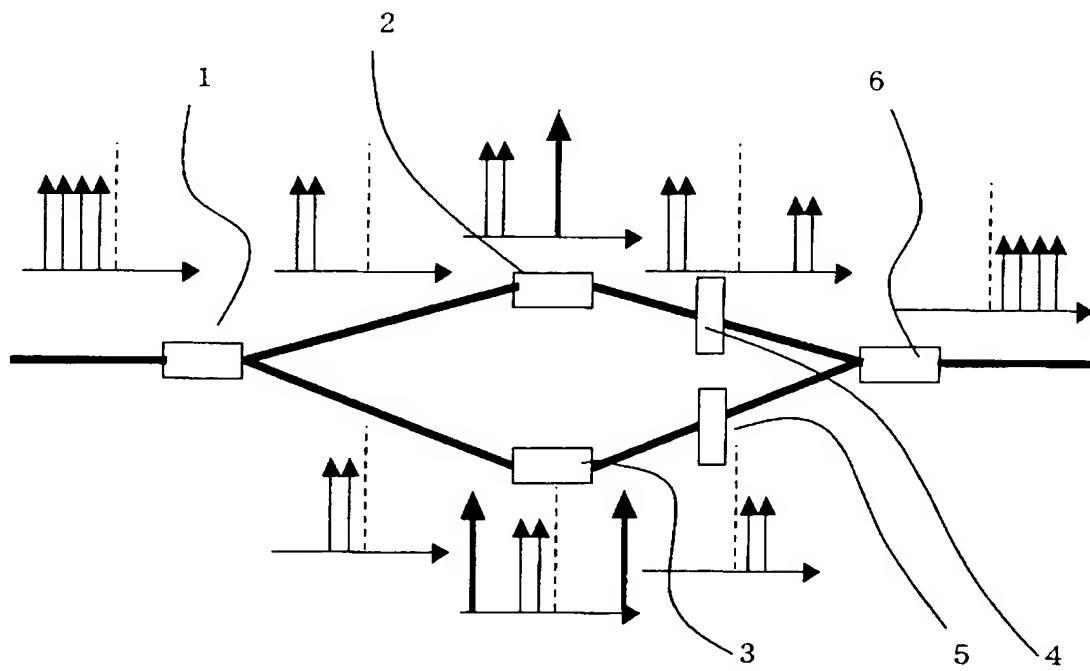
【図 6】



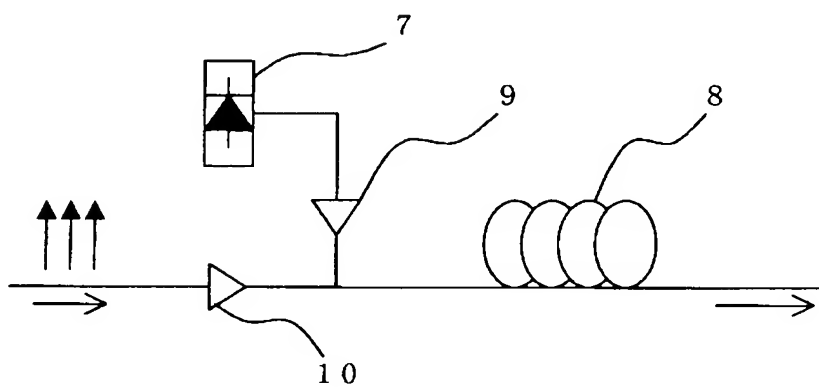
【図 7】



【図 8】

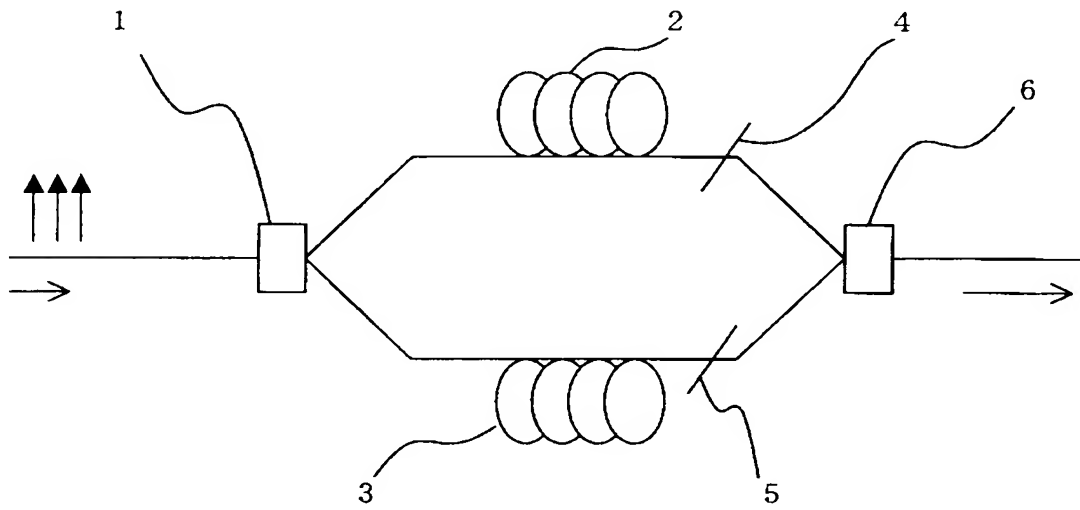


【図 9】

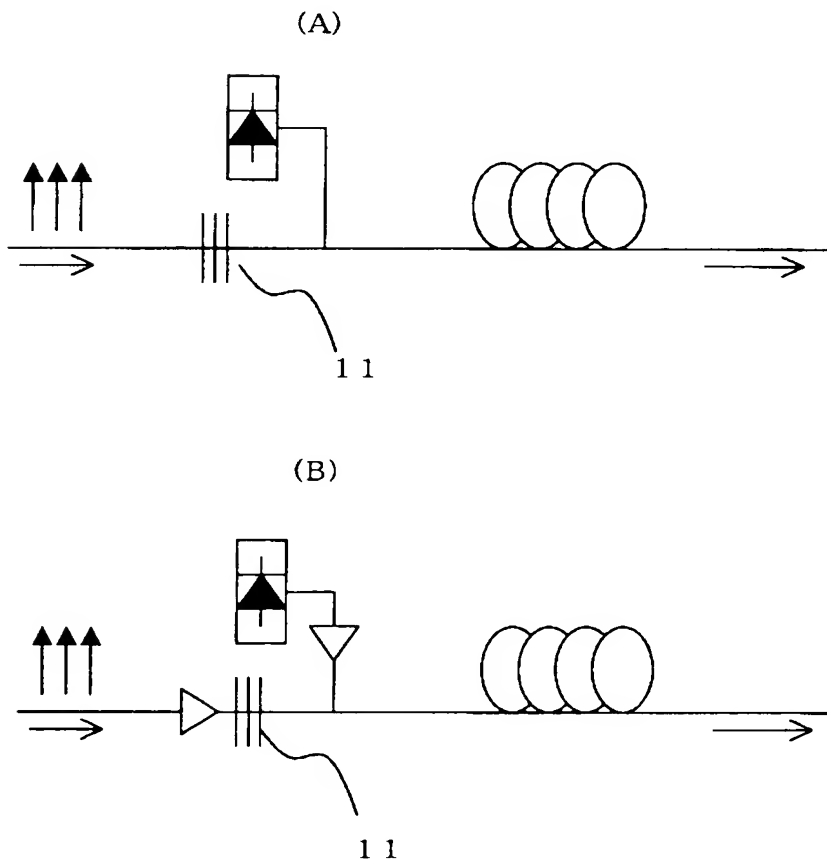




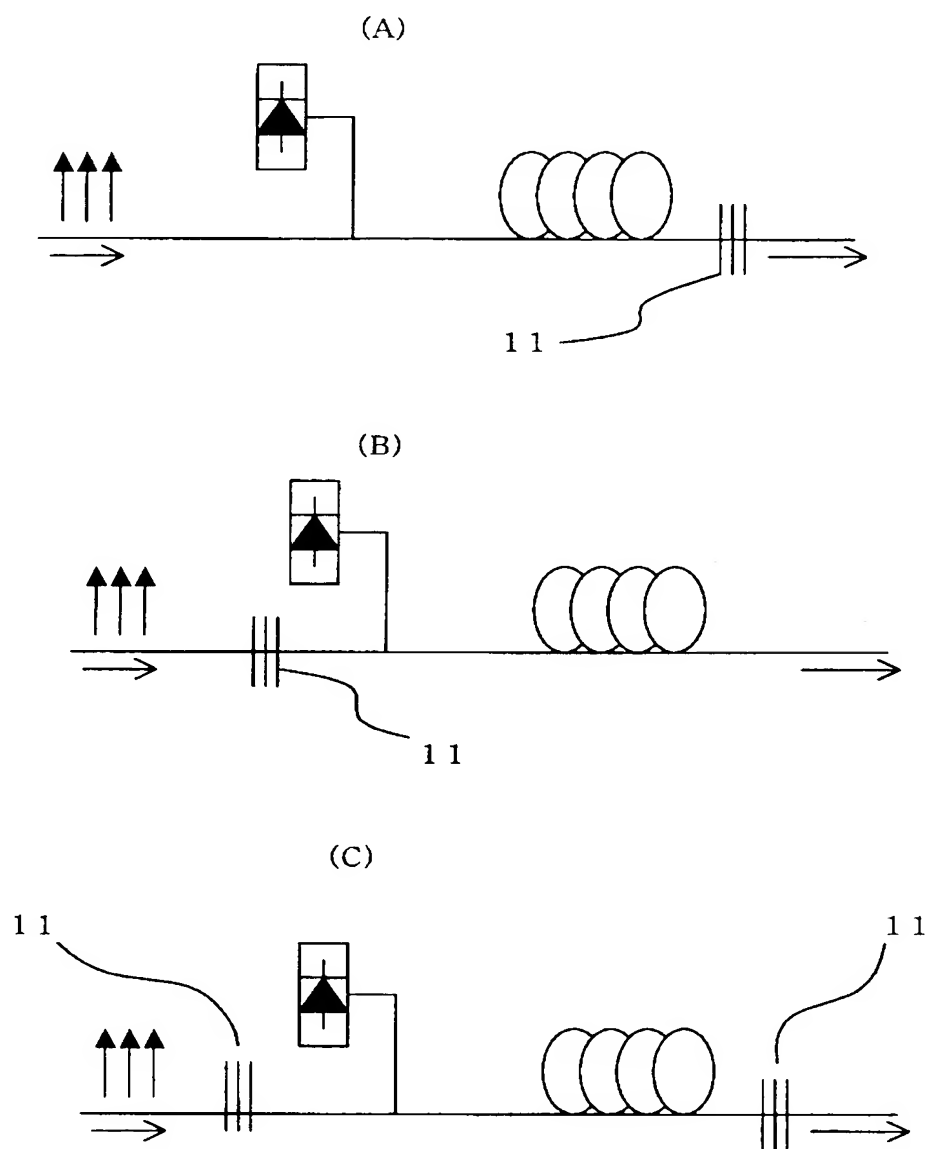
【図 10】



【図 11】

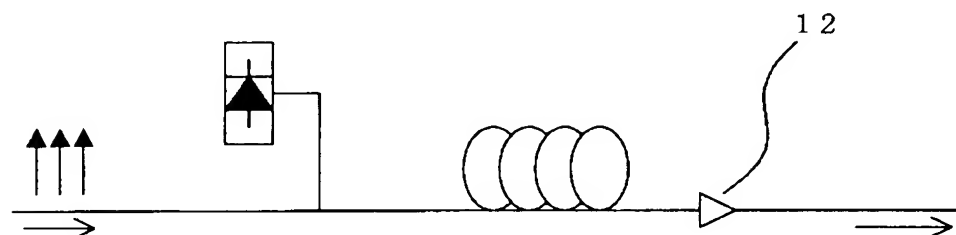


【図 1 2】

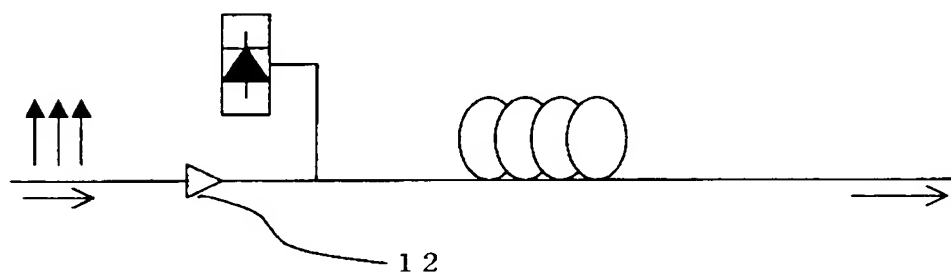


【図 13】

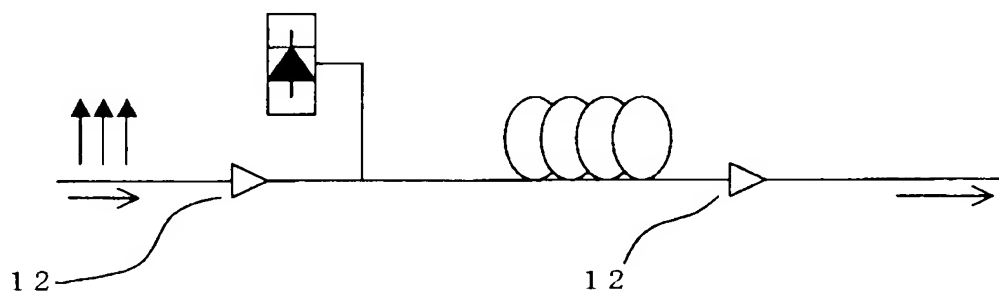
(A)



(B)

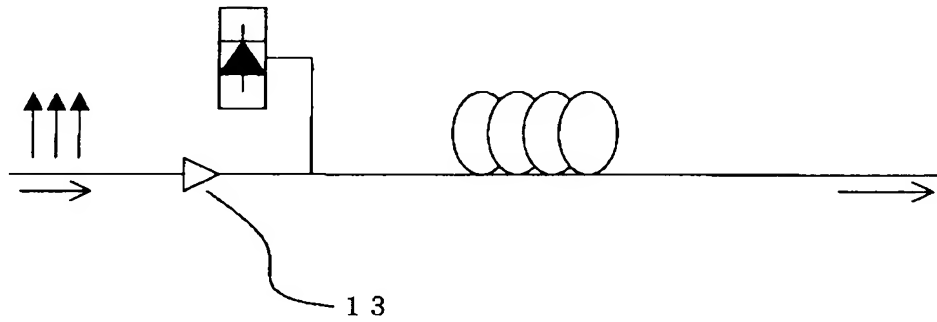


(C)

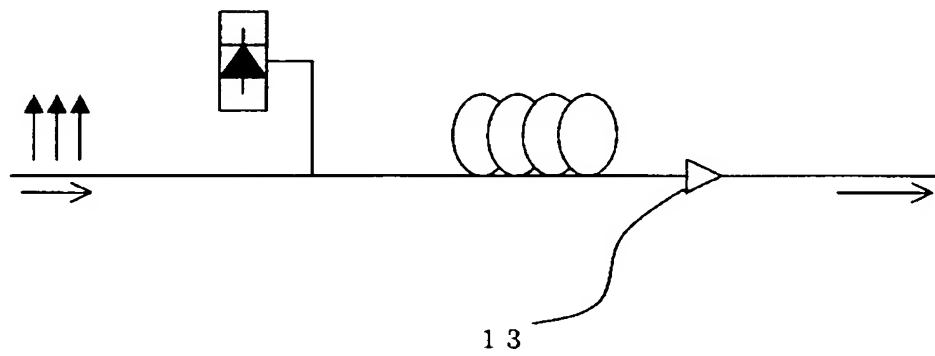


【図 14】

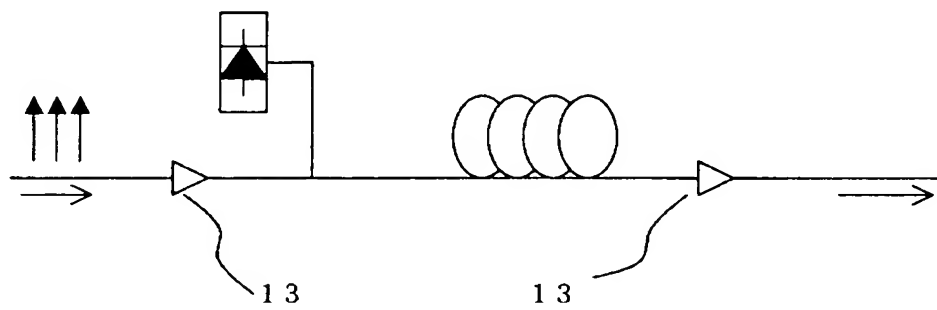
(A)



(B)



(C)



特 2 0 0 1 - 1 0 0 7 1 9

【書類名】 要約書

【要約】

【課題】波長分割多重信号光を4光波混合による波長変換を行う時、雑音が生じる。4光波混合による波長変換後の波長分割多重信号光と雑音の周波数を分離する。励起光周波数から、波長変換後の信号光に向かって、波長変換しようとする信号光の周波数帯域幅以上の帯域を持つガードバンドを設定し、この設定領域に高次4光波混合によって生じる雑音周波数を割り当てる。ガードバンド外に4光波混合による波長変換後の波長分割多重信号光を配置する1つの励起光を設定する方法と4光波波長変換前の波長分割多重信号光を2つの異なる周波数を持つ励起光の平均周波数と一方の励起光周波数の間に置いて、4光波混合による波長変換を行い、2つの励起光の平均周波数とガードバンドの間に4光波混合による波長変換後の波長分割多重信号光を配置する方法である。

【選択図】 図4

特2001-100719

認定・付加情報

特許出願の番号	特願2001-100719
受付番号	50100475163
書類名	特許願
担当官	第七担当上席 0096
作成日	平成13年 4月 3日

<認定情報・付加情報>

【提出日】 平成13年 3月30日

次頁無

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [ 0 0 0 0 0 5 2 9 0 ]

1. 変更年月日	1 9 9 0 年 8 月 2 9 日
[変更理由]	新規登録
住 所	東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号
氏 名	古河電気工業株式会社